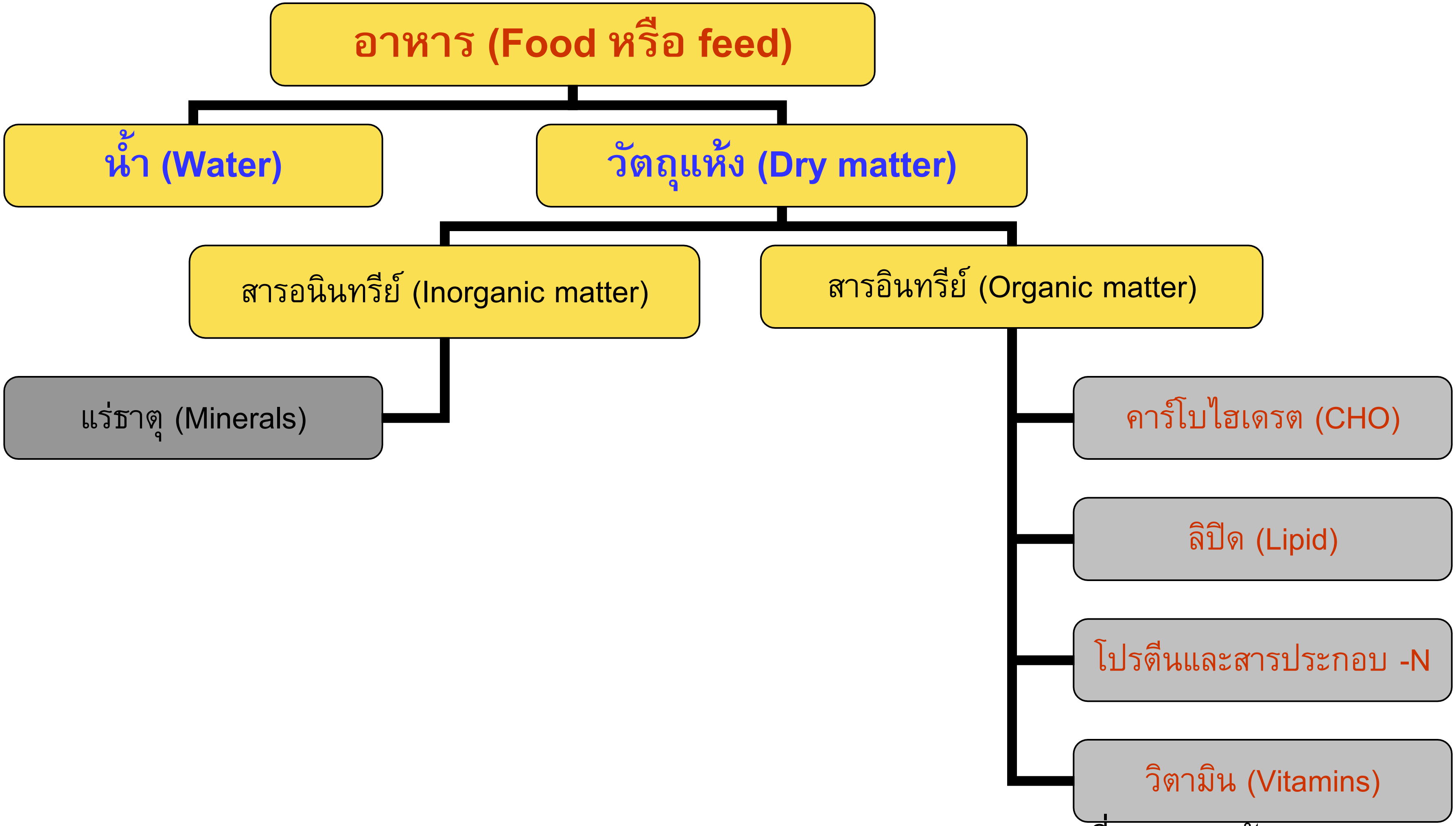
บทที่ 4.
โภชนะในอาหารสัตว์
(Nutrients)

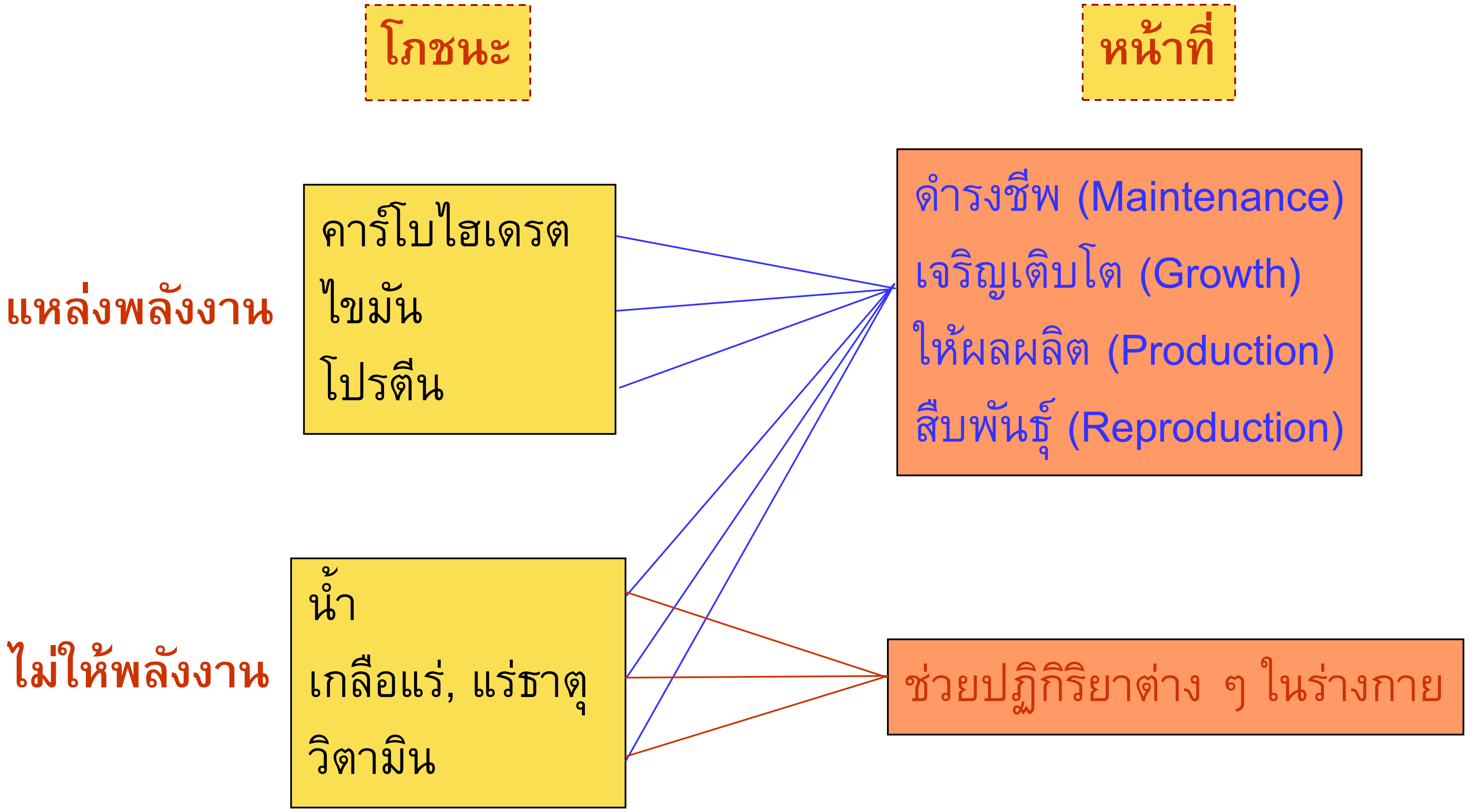
ผศ.ดร.ประภากร ธาราฉาย
คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

การจัดหมวดหมู่ของโภชนะ...



ที่มา : บุญล้อม (2546)

ความสัมพันธ์และหน้าที่ของโภชนะหมวดต่าง ๆ ในร่างกาย



ที่มา : บุญล้อม (2546)

น้ำ (Water)

บทบาทของน้ำในร่างกาย

1) เป็นส่วนประกอบขอบเซลล์ในร่างกาย ช่วยให้เซลล์คงรูปอยู่ได้
   - เลือด (Blood plasma) มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 90-92%
   - กล้ามเนื้อ (Muscle) มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 72-78%
   - ไขมัน (Fat) มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 30%
   - กระดูก (Bone) มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 45%
2) เป็นตัวละลายสารต่าง ๆ และช่วยขนถ่ายโภชนะเข้าสู่เซลล์
3) ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิร่างกาย
4) จำเป็นต่อปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการย่อยอาหารและโภชนะต่าง ๆ
5) ช่วยในการหล่อลื่น กันกระแทก ฯลฯ
6) ช่วยทำละลายสารเคมีให้ต่อมรับรสทำงานได้
7) ช่วยรักษาความชุ่มชื้นของปอดและถุงลม
8) ฯลฯ...

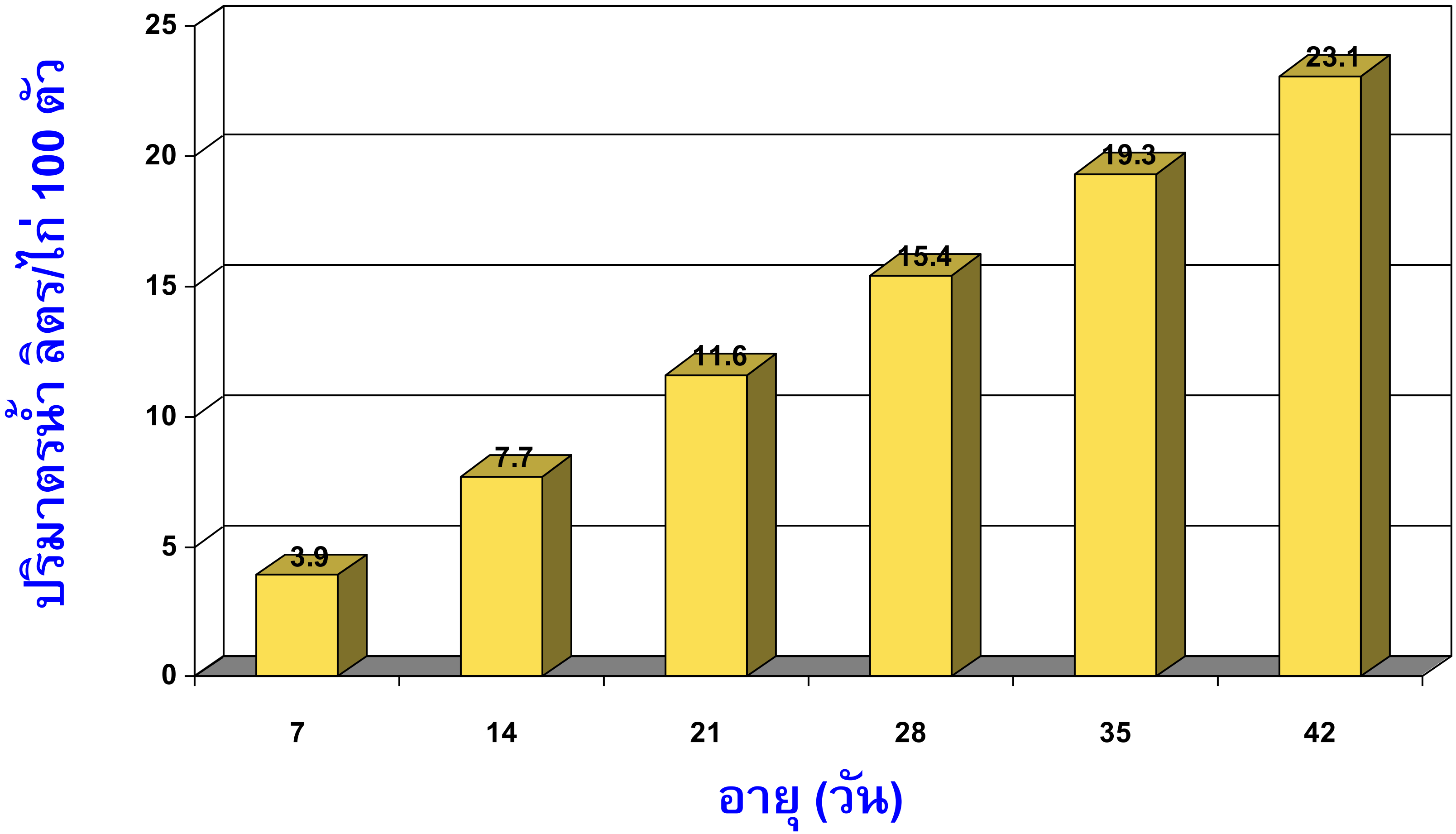
แหล่งของน้ำ

สัตว์ได้รับน้ำจาก 3 แหล่ง ดังนี้

1) **น้ำดื่ม (Drinking water)** ต้องเป็นน้ำที่สะอาด ปราศจากสิ่งเจือปนที่เป็นโทษ เช่น แร่ธาตุ อิออน หรือเชื้อจุลินทรีย์ ฯลฯ ปริมาณน้ำที่สัตว์ดื่มจะผันแปร...ขึ้นอยู่กับ
   - อายุสัตว์
   - อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
   - ความชื้นสัมพัทธ์
2) **น้ำที่มีในอาหาร (Water in feed)** โดยอยู่ในรูปของความชื้นประมาณ 10-12%
3) **น้ำจากปฏิกิริยาเคมี (Metabolic water)** เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีในร่างกาย โดยเฉพาะการออกซิไดซ์โภชนะจะทำให้เกิดน้ำที่สัตว์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow \text{Energy} + 6CO_2 + 6H_2O$$

ปริมาณน้ำดื่มของไก่เนื้อ



ดัดแปลงจาก : Bell and Weaver (2002) หน้า 413.

อุณหภูมิภายในโรงเรือนต่อการกินน้ำและอาหารของไก่เล็กฮอร์น

อุณหภูมิ °C	<19.7	21.1	23.9	26.7	28+
อาหารกิน, กรัม/ตัว/วัน	106.1	106.1	104.8	103.0	98.9
น้ำที่กิน, ลิตร/100 ตัว/วัน	18.7	19.0	18.6	19.5	21.4
น้ำ/อาหาร ที่กิน	1.70	1.74	1.72	1.83	2.08
น้ำที่กิน, % ของน้ำหนักตัว	11.51	11.29	11.09	11.52	12.71

น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในการออกซิไดซ์

โภชนะ	O_2 ที่ต้องการ		Metabolic water ที่สังเคราะห์ได้ต่อกรัมของโภชนะ, กรัม
	ลิตร/กรัม ของโภชนะที่ถูกออกซิไดซ์	ลิตร/กรัม ของน้ำที่สังเคราะห์	
แป้ง	0.83	1.49	0.56
ไขมัน	2.02	1.88	1.07
โปรตีน	0.97	2.44	0.40

- การออกซิไดซ์ไขมัน 1 กรัม จะต้องใช้ O_2 2.02 ลิตร และหากต้องการสังเคราะห์น้ำจาก Metabolic water (โดยการออกซิไดซ์ไขมัน) 1 กรัม จะต้องใช้ O_2 1.88 ลิตร ดังนั้น การออกซิไดซ์ไขมัน 1 กรัม จึงเกิด Metabolic water ขึ้น 1.07 กรัม (2.02/1.88)
- การออกซิไดซ์แป้งและโปรตีนในแต่ละกรัมจะได้น้ำออกมา 0.56 และ 0.40 กรัม ตามลำดับ

คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

- **คาร์โบไฮเดรต** เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด
- มาจากภาษาฝรั่งเศสคำว่า **'Hydro de carbon'** เนื่องจากประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), และออกซิเจน (O) เป็นหลัก..
- อัตราส่วน H : O = 2 : 1 มีสูตรทั่วไปว่า...

  $(CH_2O)_n$ โดย $n \geq 3$

  $C_6H_{12}O_6$ (Glucose)
- คาร์โบไฮเดรตบางชนิดอาจมีธาตุอื่นประกอบอยู่ด้วย เช่น ฟอสฟอรัส (P), ไนโตรเจน (N), และกำมะถัน (S)

บุญล้อม (2546)

- คาร์โบไฮเดรตบางชนิดมีสัดส่วนของ H : O ไม่เท่ากับ 2 : 1 เช่น...
  - Deoxyribose ($C_5H_{10}O_4$) หรือ
  - กรณีที่น้ำตาล 2 โมเลกุลมาเชื่อมกันจะเกิดการสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุล จึงทำให้สัดส่วน C : H : O ผิดไปจากเดิม

บุญล้อม (2546)

การแบ่งประเภทคาร์โบไฮเดรตทางเคมี

- **Carbohydrate**
  - Simple carbohydrate
    - Monosaccharide
      - Pentose
        - -Ribose
        - -Arabinose
        - -Xylose
      - Hexose
        - -Glucose
        - -Fluctose
        - -Galactose
        - -Mannose
    - Disaccharide
      - -Sucrose
      - -Lactose
      - -Maltose
      - -Cellobiose
    - Polysaccharide
      - Homopolysaccharide
        - -Starch
        - -Glycogen
        - -Cellulose
        - -Inulin
      - Heteropolysaccharide
        - -Hemicellulose
        - -Pectin
        - -Glycosaminoglycan
  - Complex carbohydrate
    - -Nucleotide
    - -Glycoprotein
    - -Glycolipid

บุญล้อม (2546)

คาร์โบไฮเดรตเชิงเดี่ยว (Simple carbohydrate)

- แบ่งออกเป็น
  - น้ำตาลโมเลกุลเดียว (Monosaccharide)
  - น้ำตาล 2 โมเลกุล (Discaccharide)
  - น้ำตาลหลายโมเลกุล (Oligo & polysaccharide)

บุญล้อม (2546)

น้ำตาลโมเลกุลเดียว (Monosaccharide)

- เป็นหน่วยเล็กที่สุดของคาร์โบไฮเดรต
- มีคาร์บอน 3-7 อะตอม
- ในธรรมชาติไม่ค่อยพบอยู่ในรูปอิสระ มักจะเป็นองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น
- สามารถแบ่งเป็นประเภทย่อยตามจำนวนคาร์บอนได้ ดังนี้
  - ไตรโอส (Triose; $C_3H_6O_3$)
  - เตทโทส (Tetrose; $C_4H_8O_4$)
  - เพนโตส (Pentose; $C_5H_{10}O_5$)
  - เฮกโซส (Hexose; $C_6H_{12}O_6$)
  - เฮพโทส (Heptose; $C_7H_{14}O_7$)

บุญล้อม (2546)

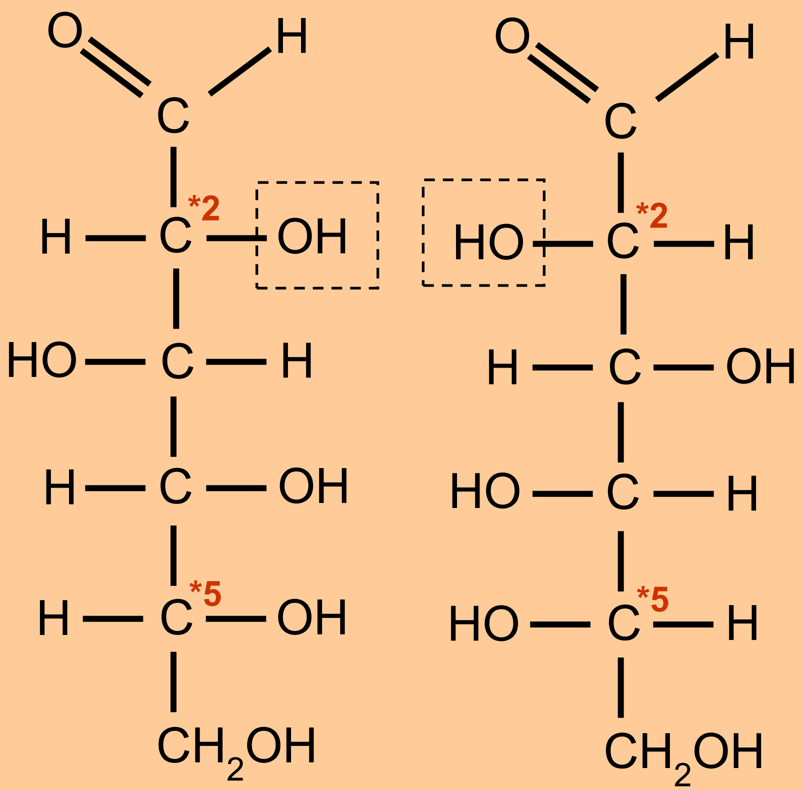
สูตรโครงสร้าง

โครงสร้างแบบเส้นตรง

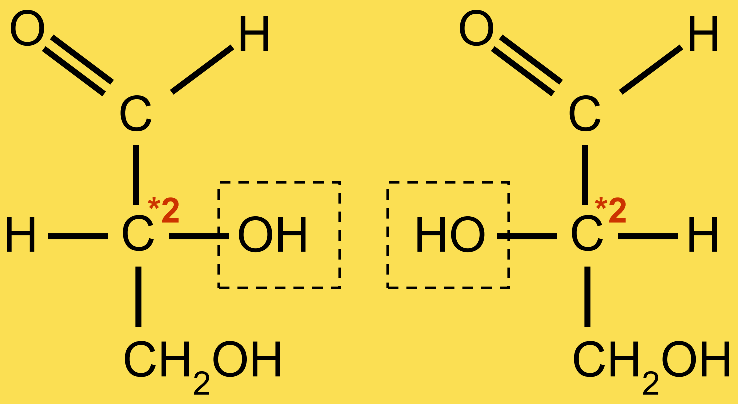
- น้ำตาลที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงทำให้อะตอมของ H และ OH ที่เกาะอยู่กับ C ที่ไม่สมมาตร (Asymmetric carbon) สามารถจัดเรียงตัวกันในทิศทางตรงกันข้าม เกิดเป็น D- และ L- isomer ขึ้นได้

- **คาร์บอนสมมาตร** (Symmetric carbon) = แขนของคาร์บอน 2 ข้างจับกับธาตุหรือกลุ่มธาตุที่เหมือนกัน
- **คาร์บอนไม่สมมาตร** (Asymmetric carbon) = แขนของคาร์บอนทั้ง 4 ข้างจับกับธาตุหรือกลุ่มธาตุที่ไม่เหมือนกันเลย
- ไอโซเมอร์แบบ D- และ L- เรียกว่า **อินแนนทิโอเมอร์** (Enantiomer)

บุญล้อม (2546)



D-glucose L-glucose



D-Glyceraldehyde L-Glyceraldehyde

D = Dextro ภาษาละติน = ขวามือ

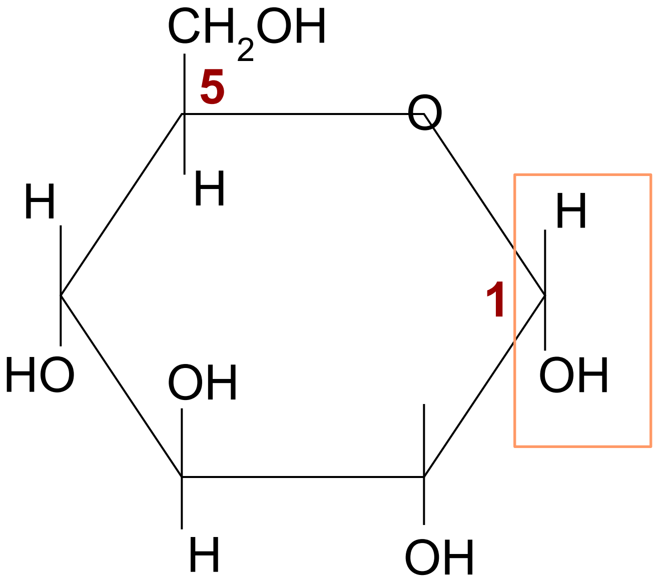
L = Levo ภาษาละติน = ซ้ายมือ

- น้ำตาลโมเลกุลเดียวที่**ใช้ประโยชน์**ได้มักพบในรูป D-
- ส่วน น้ำตาลในรูป L- จะพบในผนังเซลล์แบคทีเรีย พืช และผลไม้บางชนิด
- ในร่างกายการเปลี่ยนรูประหว่าง D- และ L- จะใช้เอนไซม์ Isomerase บุญล้อม (2546)

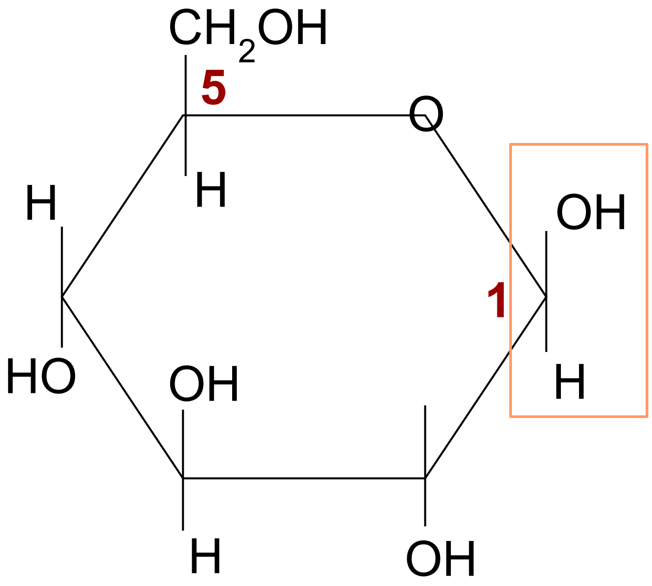
โครงสร้างแบบวงแหวน

- น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม สามารถจัดเรียงตัวกันเป็นวงแหวนได้ เช่น
  - กลูโคส มีโครงสร้างเป็นรูป 6 เหลี่ยม (Pyran ring) โดยกลุ่ม OH ของ C ตำแหน่งที่ 1 มาจับกับตำแหน่งที่ 5 ทำให้ C ตำแหน่งที่ 1 เกิดเป็นคาร์บอนไม่สมมาตร ทำให้เกิดโครงสร้างขึ้นได้ 2 แบบ คือ Alpha (α-) และ Beta (β-) ขึ้นกับทิศทางของ OH
    - OH ตำแหน่งที่ 1 หันลงล่างของแนวระนาบ จะเป็น α-
    - OH ตำแหน่งที่ 1 หันขึ้นด้านบนจะเป็น β-

บุญล้อม (2546)



α-D-Glucose



β-D-Glucose

OH ที่อยู่ด้านขวามือของโครงสร้างแบบเส้นตรงจะกลายเป็นอยู่ใต้ระนาบในโครงสร้างแบบวงแหวน

บุญล้อม (2546)

น้ำตาลเฮ็กโซส (Hexose) ที่สำคัญ ได้แก่...

- **กลูโคส** (Glucose) อาจเรียกว่า เดกซ์โทรส (Dextrose) หรือน้ำตาลองุ่น (Grape sugar) หรือ Blood sugar ก็ได้
  - มีความหวานน้อยกว่าน้ำตาลผลไม้ (Fructose) และน้ำตาลอ้อย (Sucrose)
  - เป็นองค์ประกอบของน้ำตาล Di- และ Polysaccharide
  - คาร์โบไฮเดรตในอาหารทุกชนิดมักจะเปลี่ยนเป็นกลูโคสก่อนที่จะถูกเมตตาบอไลท์ต่อไป
- **ฟลักโตส** (Fructose) อาจเรียกว่า ลีวูโลส (Levulose) หรือน้ำตาลผลไม้ (Fruit sugar)
  - มีรสหวานมาก
  - เป็นส่วนประกอบสำคัญในน้ำตาลอ้อย หัวชูการ์บีท (Sugar beet) น้ำผึ้ง อินูลิน ฯลฯ

บุญล้อม (2546)

- **กาแลกโทส** (Galactose) มีโครงสร้างคล้ายกับกลูโคส แตกต่างกันที่ทิศทางของกลุ่ม OH และ C ตำแหน่งที่ 4
  - เป็นองค์ประกอบสำคัญของน้ำตาลแลคโตสในน้ำนม
  - มักอยู่รวมกับไขมันเป็นส่วนประกอบของเซลล์ประสาท
  - เป็นส่วนประกอบของเพกตินและกัม
- **แมนโนส** (Mannose) เป็นน้ำตาลอัลโดเฮกโซสที่มีสูตรโครงสร้างคล้ายคลึงกับกลูโคส แตกต่างกันเฉพาะทิศทางของกลุ่ม OH และ C ตำแหน่งที่ 2
  - เป็นองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตหรืออาจจะจับกับโปรตีนก็ได้

กลูโคส กาแล็กโตส และแมนโนส สามารถเปลี่ยนจากตัวใดตัวหนึ่งไปเป็นอีกตัวหนึ่งได้ในร่างกายโดยการทำงานของเอนไซม์เอพิเมอเรส (Epimerase) เช่น กระบวนการสังเคราะห์น้ำตาลแลคโตสในน้ำนม

บุญล้อม (2546)

น้ำตาลเพนโตส (Pentose) ที่สำคัญ ได้แก่...

- **ไรโบส** (Ribose) และ **ดีออกซีไรโบส** (Deoxyribose) เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) คือ...
  - DNA (Deoxyribonucleic acid)
  - RNA (Ribonucleic acid)
  - เป็นองค์ประกอบของวิตามินบี$_2$ (Riboflavin)
  - สารให้พลังงานสูง เช่น ATP (Adenosine triphosphate)
- **อะราบิโนส** (Arabinose) และ **ไซโลส** (Xylose) อาจเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช เช่น เฮมิเซลลูโลส

สำหรับน้ำตาลเตทโตรส (Tetrose) และไตรโอส (Triose) มักเป็นตัวกลางในกระบวนการเมตาบอลิซึมในร่างกาย

บุญล้อม (2546)

น้ำตาล 2 โมเลกุล (Disaccharides)

- เป็นน้ำตาลที่ประกอบด้วย น้ำตาลโมเลกุลเดียว จำนวน 2 โมเลกุล ต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) ได้แก่...
- **<u>มอลโทส</u>** (Maltose) = กลูโคส + กลูโคส จับกันด้วยพันธะแบบ $\alpha(1 \rightarrow 4)$
  - เกิดจากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ α-amylase
  - ไม่ค่อยพบเป็นอิสระในธรรมชาติ
- **<u>ซูโครส</u>** (Sucrose) = กลูโคส + ฟรักโทส จับกันด้วยพันธะแบบ $\alpha(1 \rightarrow 2)$
  - พบมากในธรรมชาติ ในอ้อยและหัวบีท
  - ไม่มีคุณสมบัติในการรีดิวซ์สารอื่น (Non-reducing sugar) และไม่สามารถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) ได้ เนื่องจากไม่มีกลุ่มอัลดีไฮด์หรือกลุ่มคีโตนที่เป็นอิสระ

บุญล้อม (2546)

- **แลกโทส** (Lactose) = กลูโคส + กาแลกโทส จับกันด้วยพันธะแบบ $\beta(1\rightarrow4)$
  - พบในนมเท่านั้น (นมโค = 4.5%, นมคน = 7%)
  - ในลูกสัตว์มีเอนไซม์ β-D-galactosidase หรือ Lactase จึงสามารถย่อยน้ำตาลแลคโทสแล้วดูดซึมเข้ากระแสโลหิตได้
- **เซลโลไบโอส** (Cellobiose) = กลูโคส + กลูโคส จับกันด้วยพันธะแบบ $\beta(1\rightarrow4)$
  - เป็นส่วนประกอบของเซลลูโลสที่เป็นผนังเซลล์ของพืช

บุญล้อม (2546)

โอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide)

- ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดียว จำนวน 3-10 โมเลกุล
  - มีน้ำตาล จำนวน 3 โมเลกุล เรียกว่า Trisaccharide เช่น
    - เมเลซิโทส (Melezitose) = Glucose + Fructose + Glucose
    - ราฟิโนส (Raffinose) = Fructose + Glucose + Galactose
  - มีน้ำตาล จำนวน 4 โมเลกุล เช่น
    - สตาชิโอซ (Stachyose) = Fructose + 2Galactose + Glucose

บุญล้อม (2546)

โพลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide)

เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยน้ำตาลจำนวนมาก เป็นส่วนประกอบสำคัญของเนื้อเยื่อหลายชนิดทั้งพืชและสัตว์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามชนิดของน้ำตาล ดังนี้...

- โฮโมโพลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) ประกอบด้วยน้ำตาลชนิดเดียวกันมาต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะไกลโคซิดิก
  - น้ำตาลหลายโมเลกุลมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวเรียกว่า ไกลแคนส์ (Glycans)
  - กลูโคสมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวกเรียกว่า กลูแคนส์ (Glucans)
  - แมนโนสมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว เรียกว่า แมนแนนส์ (Mannans)
  - กาแลกโทสมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว เรียกว่า กาแลกแทนส์ (Galactans)

บุญล้อม (2546)

- **เฮเทอโรโพลิแซ็กคาไรด์** (Heteropolysaccharide) ประกอบด้วยน้ำตาล 2 ชนิดขึ้นไป ส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของพืช ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เพกติน กัม มิวซิเลจ และเรซิน

บุญล้อม (2546)

Polysaccharide ได้แก่

- แป้ง (Starch) เป็นแหล่งสะสมพลังงานที่สำคัญในพืช ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสทั้งหมด เรียกว่า Glucans โมเลกุลของแป้งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ...
  - **อะไมโลส** (Amylose) กลูโคสจับกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแบบ $\alpha(1\rightarrow4)$ มีโครงสร้างขดเป็นเกลียว (Helix structure) **ละลายน้ำได้ดี** เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจะเป็น**สีน้ำเงิน**
  - **อะไมโลเพกติน** (Amylopectin) กลูโคสจับกันด้วยพันธะแบบ $\alpha(1\rightarrow4)$ และมีการแตกแขนงด้วยพันธะแบบ $\alpha(1\rightarrow6)$ **เป็นส่วนที่ไม่ละลายน้ำ** เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจะเป็น**สีม่วง**

แป้งในพืช

ส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสประมาณ 15-25% และอะไมโลเพกตินประมาณ 75-85%

บุญล้อม (2546)

- ไกลโคเจน (Glycogen) เป็นแหล่งสะสมพลังงานในสัตว์ พบมากในตับและกล้ามเนื้อ
  - มีโครงสร้างเหมือนกับอะไมโลแพกติน คือ มีกลูโคสต่อกันด้วยพันธะแบบ $\alpha(1\rightarrow4)$ และ $\alpha(1\rightarrow6)$ แต่มีการแตกแขนงมากกว่า
  - อาจเรียกว่า **แป้งในสัตว์** (Animal starch)
  - **ละลายน้ำได้ดี**
  - ทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจะได้**สีแดง**
  - เมื่อไกลโคเจนถูกย่อยด้วยเอนไซม์ Phosphorylase จะได้เป็น Glucose-1-phosphate ซึ่งจะถูกเมตตาบอไลท์ต่อไป

บุญล้อม (2546)

- **อินูลิน (Inulin)** เป็นสารคล้ายแป้งที่พบในส่วนหัวของพืชบางชนิด เช่น หัวรักเร่ หอม กระเทียม และเจรูซาเล็ม อาร์ติโชก (Jerusarem artichoke)
  - ประกอบด้วยฟรักโทสจับกันด้วยพันธะแบบ $\beta(2\rightarrow1)$ จึงอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ฟรักโทแซน (Fluctosan) หรือ ฟรักแทน (Fluctan)
  - ปัจจุบันใช้อินูลินเป็นสารเสริมสุขภาพเนื่องจากมีบทบาทเป็นสาร **Prebiotic**

บุญล้อม (2546)

- **เซลลูโลส (Cellulose)** เป็น Polysaccharide ที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ
  - เป็นองค์ประกอบของเซลล์พืช (เยื่อใย)
  - ทนต่อการย่อยด้วยกรดและด่าง
  - ประกอบด้วยกลูโคสมาต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแบบ $\beta(1\rightarrow4)$ ซึ่งพันธะนี้ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในสัตว์ชั้นสูง แต่จุลินทรีย์มีเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) ที่สามารถย่อยได้
  - ในสัตว์เคี้ยวเอื้อง (วัว ควาย) มีจุลินทรีย์ช่วยย่อยในกระเพาะหมัก ส่วนม้าและกระต่าย มีจุลินทรีย์ในไส้ติ่ง

บุญล้อม (2546)

- **เฮมิเซลลูโลส** (Hemicellulose)
  - เป็นองค์ประกอบของเซลล์พืช ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในสัตว์กระเพาะเดี่ยว แต่ย่อยได้โดยจุลินทรีย์
  - เป็น Heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยน้ำตาลมากกว่า 2 ชนิด เช่น
    - Xylose, Arabinose, Glucose, Mannose, Galactose และ Glucuroric acid
  - เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแบบ $\beta(1\rightarrow4)$ และอาจจะมี Side chain ด้วย
  - จำแนกตามชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบได้เป็น...
    - Mannan, Galactan, Xylan, Glucomannan, Arabinoxylan และ Arabinogalctan

บุญล้อม (2546)

- **เพกติน** (Pectin) เป็น Hetteropolysaccharide ที่สำคัญชนิดหนึ่งในผนังเซลล์พืชอยู่ร่วมกับเซลลูโลส
  - ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกันคล้ายกาว
  - ละลายได้ในน้ำเย็น แต่ไม่ละลายในน้ำร้อน
  - มีมากใน เปลือกส้ม, เปลือกมะนาว, กากแอปเปิ้ล, และกากหัวบีท
  - เพกตินมีคุณสมบัติคล้ายวุ้น ใช้ทำแยม

บุญล้อม (2546)

- **ไกลโคสะมิโนไกลแคน (Glycosaminoglycan)** เดิมเรียกว่า มิวโคพอลิแซ็กคาไรด์ (Mucopolysaccharide) ประกอบด้วย น้ำตาลและกรดอะมิโน ชนิดที่สำคัญได้แก่....
  - **ไคติน** (Chitin) เป็นส่วนประกอบสำคัญของผนังเซลล์สัตว์และจุลินทรีย์บางชนิด เช่น...
    - กระดองปู เปลือกกุ้ง หอย แมลง ใยแมงมุม หนอน เห็ด แกนปลาหมึก และยีสต์ที่ใช้หมักเบียร์
    - มีการผลิตเป็นการค้าโดยการสกัดจาก เปลือกกุ้ง เปลือกปู และแกนปลาหมึก
      - ใช้ทำเครื่องสำอาง
      - สารแต่งบาดแผล
      - เป็นอาหารเสริมสุขภาพ เช่น บำรุงกระดูกอ่อน ลดความอ้วน ลดความดัน ลดไขมันในเลือด ฯลฯ
      - เร่งการเจริญเติบโตของพืช เพิ่มผลผลิต ใช้เคลือบผิวผลไม้

บุญล้อม (2546)

- **คอยดรอยตินซัลเฟต** (Chondroitin sulphate) พบมากในกระดูกอ่อน เส้นเอ็น และพังผืด
- **กรดไฮยาลูโรนิก** (Hyaluronic acid) เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง พบในน้ำหล่อเลี้ยงลูกตา และของเหลวที่หล่อลื่นข้อต่อ (Synovial fluid)
- **เฮพาริน** (Heparin) เป็นสารป้องกันการแข็งตัวของเลือด

บุญล้อม (2546)

คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (Compound carbohydrate)

คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน ได้แก่....

- **นิวคลีโอไซด์** (Nucleoside) และ **นิวคลีโอไทด์** (Nucleotide) เป็นส่วนประกอบสำคัญของ DNA และ RNA
  - ประกอบด้วยน้ำตาล Ribose หรือ Deoxyribose จับกับเบสชนิดเพียวรีน (Purine) หรือไพริมิดิน (Pyrimidin)
  - ถ้าเป็น**นิวคลีโอไทด์ จะมีหมู่ฟอสเฟตเข้ามาจับด้วย**
  - มีบทบาทในการสังเคราะห์โปรตีน
- **ไกลโคโปรตีน** (Glycoprotein) ประกอบด้วยพอลีแซ็กคาไรด์และโปรตีน เช่น
  - สารหมู่เลือดบนผนังเซลล์เม็ดเลือดแดง ซึ่งอาจเรียกว่า ไกลโคโฟริน (Glycophorin)
- **ไกลโคลิพิด** (Glycolipid) ประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์และลิพิด

บุญล้อม (2546)

การแบ่งประเภทคาร์โบไฮเดรตทางโภชนศาสตร์สัตว์

ในทางอาหารสัตว์ แบ่งคาร์โบไฮเดรตออกเป็น 2 ประเภทคือ...

1) ประเภทโครงสร้าง... ได้แก่ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ฯลฯ

1) อยู่ในผนังเซลล์ของพืช

2) ทำหน้าที่ช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับพืช

3) สัตว์กระเพาะเดี่ยวไม่สามารถย่อยได้ ต้องอาศัยการย่อยโดยจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร เช่น โค กระบือ แพะ แกะ ม้าและกระต่าย ฯลฯ

2) ประเภทไม่ใช่โครงสร้าง... ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล

1) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ง่ายโดยเอนไซม์จากตัวสัตว์

2) ใช้ประโยชน์ได้ทั้งสัตว์กระเพาะเดี่ยว และสัตว์กระเพาะรวม..

บุญล้อม (2546)

การวิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในอาหารสัตว์โดยวิธี **Proximate** นั้น ไม่ใช่วิเคราะห์หาคาร์โบไฮเดรตโดยตรง แต่เป็นการวิเคราะห์เป็นกลุ่ม ตามความทนทานต่อการย่อยด้วยกรดและด่าง... แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ..

1) **เยื่อใย** (Crude fiber) หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้าง รวมทั้งลิกนินซึ่งไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตด้วย

2) **ไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทร็ก** (Nitrogen free extract) เป็น คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่าย คือ แป้ง และน้ำตาล

บุญล้อม (2546)

การวิเคราะห์เยื่อใยแบบดีเทอร์เจนท์ (Detergent method) จะให้ข้อมูลของเยื่อใยที่ละเอียดกว่าการวิเคราะห์แบบ Proximate… แบ่งเป็น

1) **Neutral detergent fiber (NDF)** หมายถึง...**พวกผนังเซลล์ทั้งหมด** ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ถ้าหักส่วนนี้ออกจากวัตถุแห้งส่วนที่เหลือก็จะเป็นคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในเซลล์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกแป้งและน้ำตาล

2) **Acid detergent fiber (ADF)** หมายถึง... **ส่วนที่เป็นลิกนินและเซลลูโลส** ถ้าหักส่วนที่ออกจาก NDF จะได้ค่าของเฮมิเซลลูโลส

Hemicellulos = NDF-ADF

3) **Acid detergent lignin (ADL)** หมายถึง... ลิกนินซึ่งเอนไซม์และจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้

บุญล้อม (2546)

การแบ่งคาร์โบไฮเดรตจากพืช... โดยนักโภชนศาสตร์สัตว์ยุคใหม่..

แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ...

1. **ส่วนที่เป็นแป้ง** (Starch)
2. **ส่วนที่ไม่ใช่แป้ง** (Non-starch carbohydrate, NSP) ซึ่งหมายรวมถึง โอลิโกแซ็กคาไรด์และโพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (Non-starch polysaccharide, NSP)

คาร์โบไฮเดรตประเภทนี้ไม่สามารถย่อยได้ในสัตว์กระเพาะเดี่ยว แต่จะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ (Volatile fatty acid, VFA)

บุญล้อม (2546)

Non-starch polysaccharide, NSP มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เราจึงแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ...

1) **เซลลูโลส** (Cellulose) ไม่ละลายน้ำ ด่าง หรือในกรดอ่อน

2) **โพลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส** (Non-cellulosis polymers) ได้แก่...

1) อะราบิโนไซแลน (Arabinoxalan)
2) เบต้ากลูแคน (β-glucan)
3) ฟรักแทน (Fructan)

} จับกันด้วยพันธะต่าง ๆ ละลายน้ำได้บ้าง

3) **เพคติน** (Pectin) ละลายน้ำได้บ้าง

NSP ที่ละลายน้ำได้ มักมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำและพองตัวเป็นวุ้น ทำได้เกิดความหนืด (Viscosity) ในทางเดินอาหาร เป็นอุปสรรคในการเข้าทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ จึง**ทำให้การย่อยได้ลดลง** โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน**ไก่เล็ก**

มีการผลิต NSP enzyme เพื่อช่วยย่อยพวก NSP ได้ดีขึ้นจำหน่ายเป็นการค้า...

บุญล้อม (2546)

การนำ NSP มาเป็น Prebiotic…

มีการนำ NSP โดยเฉพาะที่ละลายน้ำได้บางส่วนมาใช้ประโยชน์ในรูป **Prebiotic** หรือ **สารส่งเสริมชีวนะ**

Prebiotic (สารส่งเสริมชีวนะ) หมายถึง… คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยไม่ได้ในลำไส้เล็ก **แต่** มีบทบาทในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ เช่น…

- แลคโตแบซิลลัส (*Lactobacillus spp.)* และ
- ไบฟิโดแบคทีเรียม (*Bifidobacterium spp*.)

แต่ขัดขวางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นโทษ เช่น…

- อีโคไล (*E. coli*)
- คลอสตรีเดียม (Clostridium)
- โคลิฟอร์ม (Coliform) และ
- แบคเทอรอยเดส (Bacteroides)

บุญล้อม (2546)

กลไกการการเกิด Prebiotic...

- **NSP** ไม่ถูกย่อยในลำไส้เล็ก แต่จะถูกหมักย่อยโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ เกิดเป็นกรดไขมันระเหยได้ หรือกรดไขมันสายสั้น (Short chain fatty acids, SCFA) กรดไขมันเหล่านี้ทำให้ pH ในลำไส้ลดลง ไม่เหมาะแก่การเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นโทษ แต่จะส่งเสริมจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์
- การที่ pH ในลำไส้ลดลง จะช่วยให้การดูดซึมแร่ธาตุโดยเฉพาะแคลเซียม แมกนีเซียมและสังกะสี ดีขึ้น
- **ตัวอย่าง Prebiotic** เช่น...
  - Fructo-oligosaccharide (FOS)
  - Galacto-oligosaccharide (GOS)
  - Manno-oligosaccharide (MOS) และ
  - Inulin
- **Prebiotic จะใช้ควบคู่กับ Probiotic** หรือสารเพื่อปฏิชีวนะ ซึ่งรวมถึงจุลินทรีย์ที่มีชีวิตด้วย

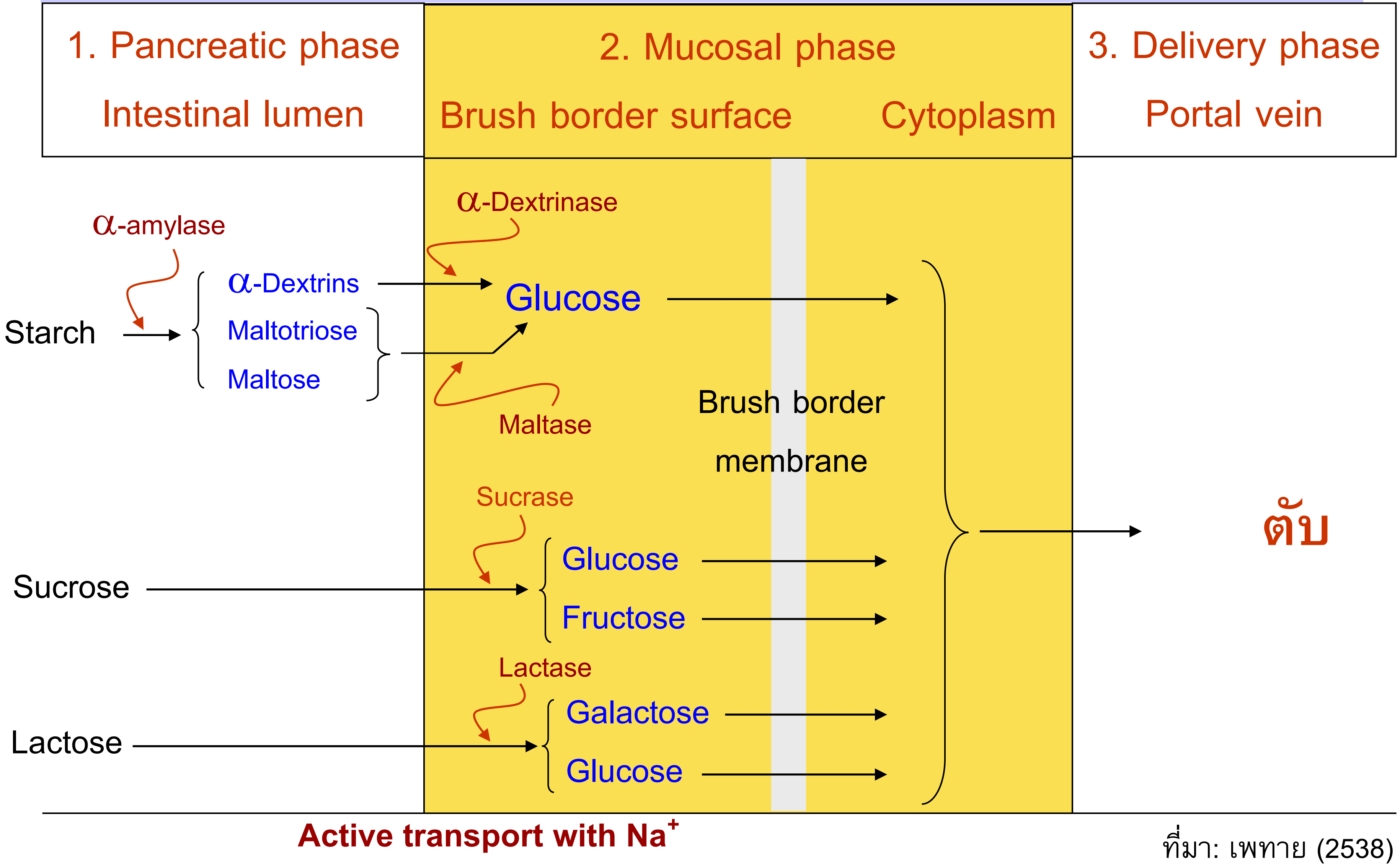
บุญล้อม (2546)

หน้าที่ของคาร์โบไฮเดรต

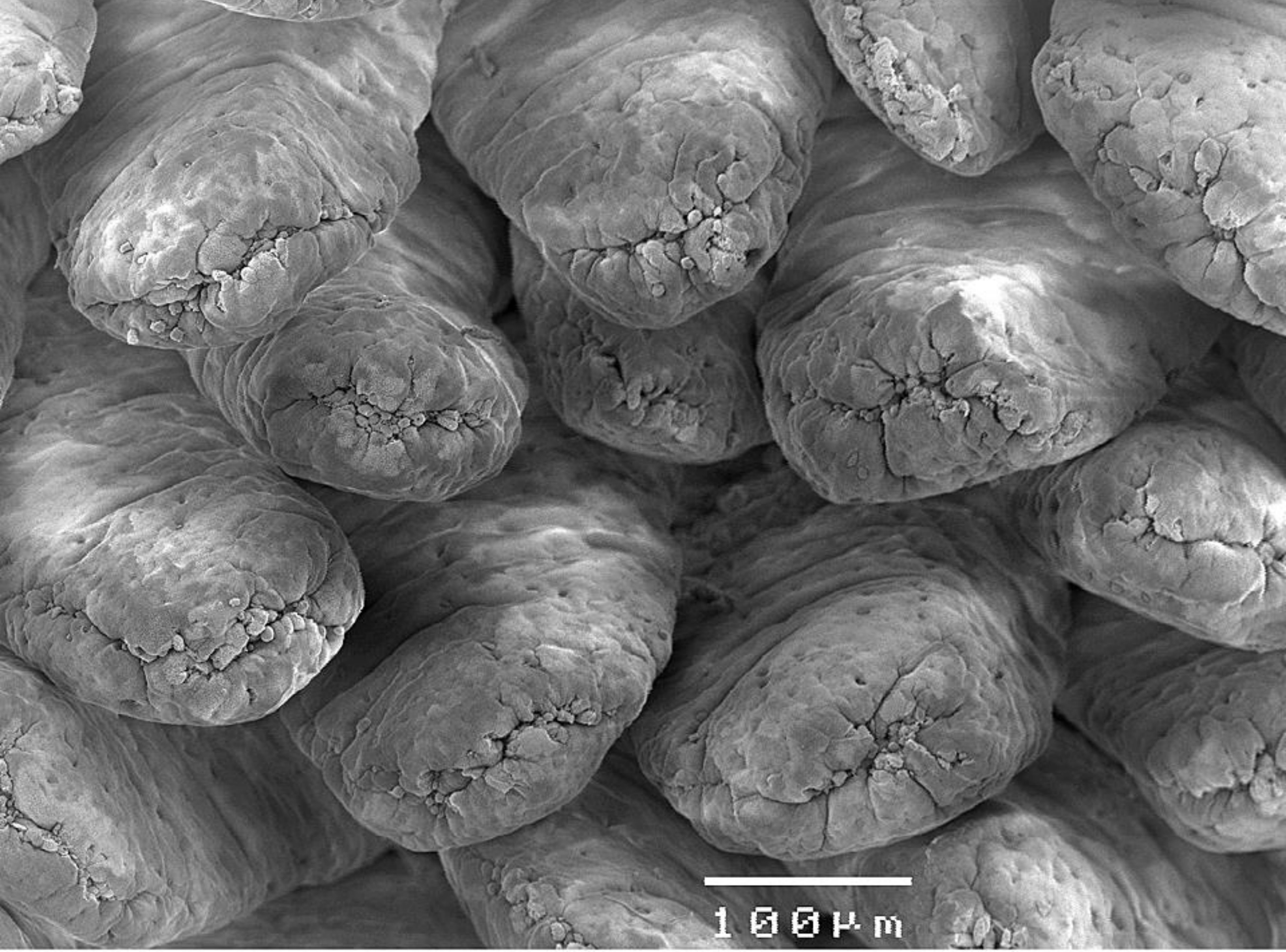
1) เป็นแหล่งพลังงานเพื่อใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต แป้งในพืช และไกลโคเจนในตับและกล้ามเนื้อของสัตว์ จะถูกย่อยสลายเป็นกลูโคส ซึ่งเป็นสารเริ่มต้นในการสร้าง ATP
2) น้ำตาล Ribose และ Deoxyribose เป็นส่วนประกอบสำคัญของ RNA, DNA, ATP, NADP, NAD และ ฟลาโวโปรตีน ฯลฯ
3) เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช และเป็นส่วนประกอบของเปลือกกุ้ง ปู แกนปลาหมึก ฯลฯ ช่วยเพิ่มความแข็งแรง..
4) เป็นองค์ประกอบของสารเชิงซ้อนในรูปของไกลโคโปรตีนและไกลโคลิปิด ซึ่งมีบทบาททางสรีระมากมาย
5) เป็นตัวกลางสำคัญในกระบวนการ Metabolism ต่าง ๆ ในร่างกาย

บุญล้อม (2546)

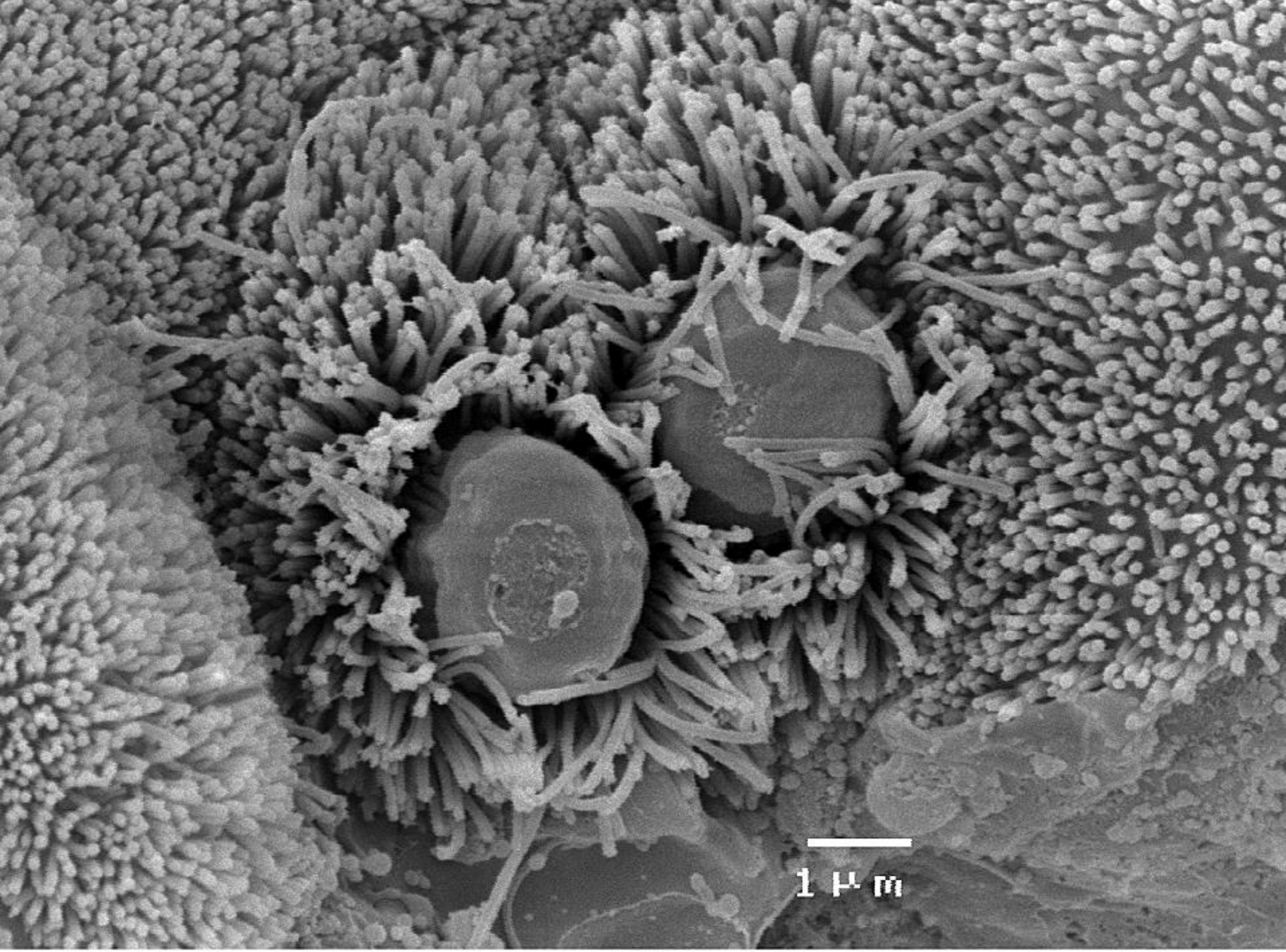
การย่อยและการดูดซึมคาร์โบไฮเดรต



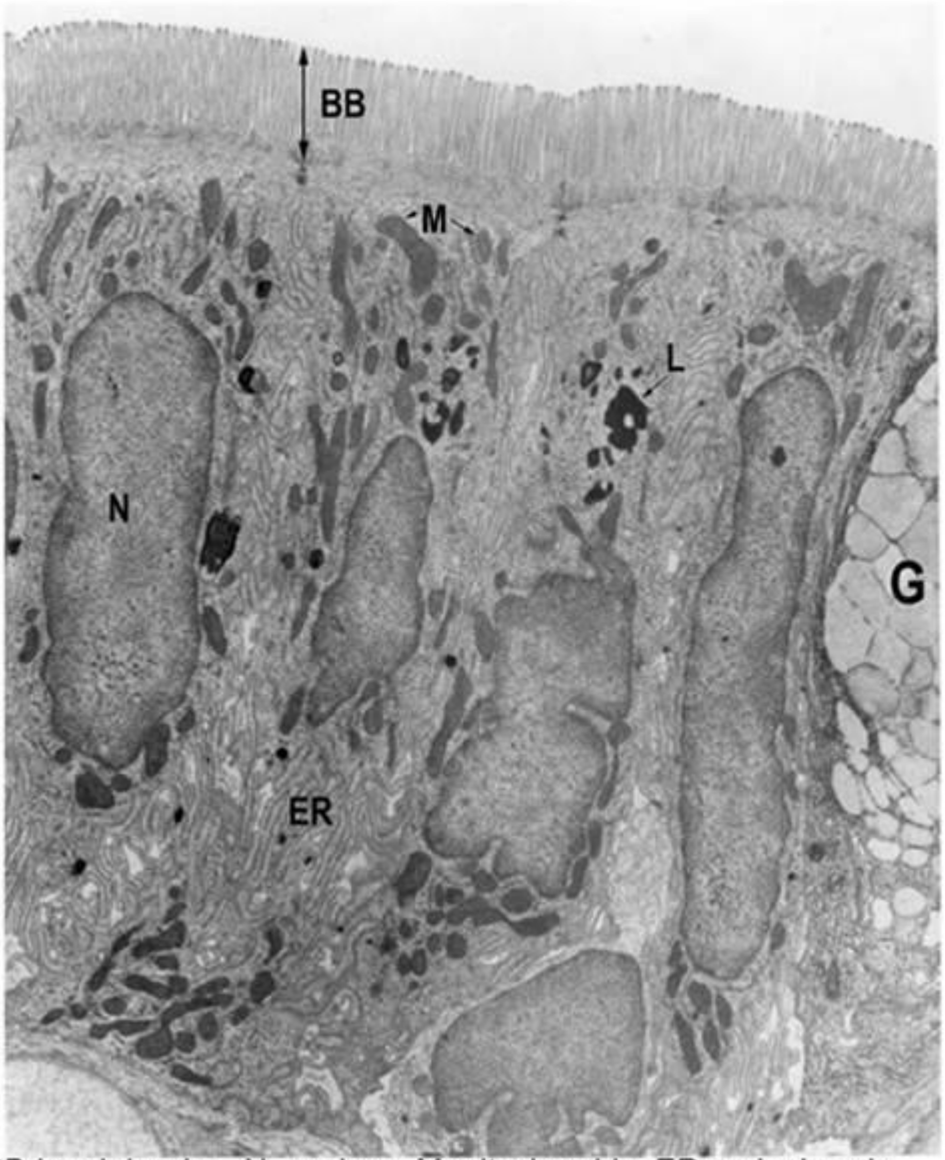
ที่มา: เพทาย (2538)



R 14 d Control (-COC, +Drug) Duodenum ; X 200



BR 21d COC +AG 0.25% Duodenum : X10,000



BB-brush border, N- nucleus, M-mitochondria, ER-endoplasmic reticulum, L-secondary lysosomes, G- goblet cell

การสลายคาร์โบไฮเดรต

- **เมตาบอลิซึม** (Metabolism) คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตโดยมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการเมตาบอลิซึมแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ...
  - **แคแทบอลิซึม** (Catabolism) เป็นกระบวนการสลายสารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก และได้พลังงานออกมาเพื่อใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น การสังเคราะห์โภชนะ การหายใจ การสูบฉีดโลหิต และการเคลื่อนไหว ฯลฯ
  - **อะนาบอลิซึม** (Anabolism) เป็นกระบวนการสังเคราะห์สารโมเลกุลเล็กให้เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ร่างกายต้องการ โดยใช้พลังงานที่ได้จากการสลายสารพลังงานสูง (ATP, ADP, AMP) ในเซลล์

บุญล้อม (2546)

- ผลของกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ คือ **พลังงาน** (Energy) เพื่อใช้ในการทำงานและการสังเคราะห์สิ่งต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น....
  - การขนส่งสารแบบแอคทีฟ (Active transport)
  - การหดตัวของกล้ามเนื้อ
  - การหายใจ
  - การสูบฉีดโลหิต
  - การเคลื่อนไหว
  - การสังเคราะห์คาโบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ฯลฯ

พลังงานที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึม เรียกว่า พลังงานชีวเคมี (Biochemical energy)

บุญล้อม (2546)

การเกิด ATP

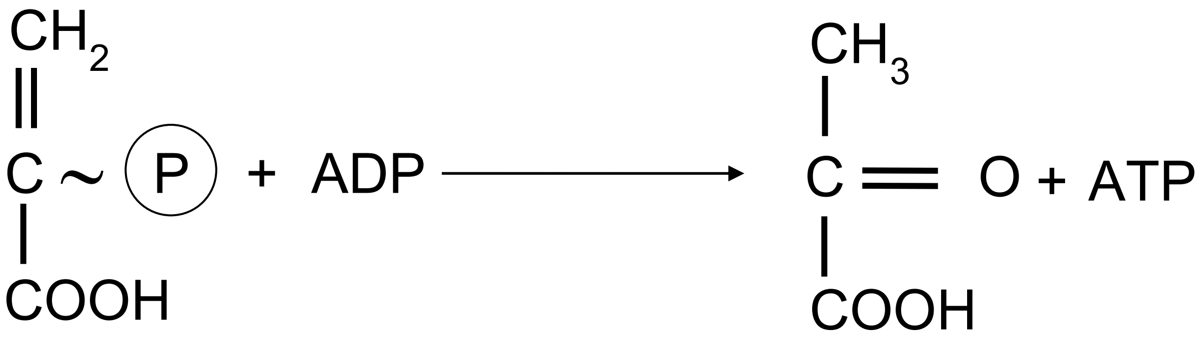
- ในกระบวนการเมตาบอลิซึมจะมีพลังงานชีวเคมีเกี่ยวข้องด้วยเสมอ พลังงานชีวเคมีจะอยู่ในรูปของ **ATP (Adenosine triphosphate)**
  - ATP = Adenine (เป็นเพียวรีนเบส) + ฟอสเฟส 3 หมู่ พันธะที่เชื่อมหมู่ฟอสเฟต 2 หมู่หลังมีพลังงานสูง (High energy phosphate bond)
  - เมื่อสลายหมู่ฟอสเฟตออก 1 หมู่ จะได้ ADP + ฟอสเฟตอนินทรีย์ (P_i)
  - แต่ถ้าสลายหมู่ฟอสเฟตออกมา 2 หมู่จะได้ AMP + ไพโรฟอสเฟตอนินทรีย์ (PP_i)
  - การสลาย ATP นี้จะให้พลังงานประมาณ **8.3 กิโลแคลอรี/โมล** (34.7 กิโลจูล/โมล)

บุญล้อม (2546)

การสร้าง ATP โดยการเติมหมู่ฟอสเฟต

มี 2 วิธี...

๑. **การเติมหมู่ฟอสเฟตระดับสับสเตรท** (Substrate level phosphorylation) คือ การที่ ADP หรือ AMP ทำปฏิกิริยากับสารพลังงานโดยตรง เช่น ฟอสโฟอินนอลไพรูเวท (Phosphoenolpyruvate)



Phosphoenolpyruvate **Pyruvate**

บุญล้อม (2546)

๒. **การเติมหมู่ฟอสเฟตโดยวิธีออกซิเดทีฟ** (Oxidative phosphorylation) คือ การเติมหมู่ฟอสเฟตให้กับ ADP ควบคู่ไปกับการออกซิไดซ์ อิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านสารต่าง ๆ ในระบบขนส่งอิเล็กตรอน (Electron transport system) หรืออาจเรียกว่า **ลูกโซ่การหายใจ (Respiratory chain)**

- โดย H^+ จะถูกดึงออกซับสเตรทแล้วส่งผ่านตัวกลางต่าง ๆ ตามลำดับเพื่อรวมตัวกับ O_2 จนเกิดเป็นน้ำในตอนท้ายของปฏิกิริยา และมี ATP เกิดขึ้นในขั้นตอนต่าง ๆ รวม 5 ATP

$$NADH\ (+H^+) + 1/2O_2 + 3ADP + 3PO_4 \longrightarrow NAD^+ + 3ATP + H_2O$$

$$FADH_2 + 1/2O_2 + 2ADP + 2PO_4 \longrightarrow FAD^+ + 2ATP + H_2O$$

บุญล้อม (2546)

การสลายคาร์โบไฮเดรต

- **น้ำตาลโมเลกุลเดียวที่ร่างกายดูดซึม** ได้แก่
  - Glucose
  - Fructose (ในกรณีที่ร่างกายได้รับ Sucrose มาก ๆ)
  - Galactose (ในกรณีที่ร่างกายได้รับ Lactose สูง ๆ)
- **การใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงาน** จะต้องผ่านกระบวนการ 3 ขั้นตอน...
  - วิถีไกลโคไลซีส (Glycolysis)
  - การเปลี่ยนไพรูเวทให้เป็นอะซิติล โคเอ (Acetyl CoA)
  - วัฏจักรเครบส์ (Krebs' cycle)

บุญล้อม (2546)

วิถีไกลโคไลซีส (Glycolysis)

- ค้นพบโดย Embden และ Mayerhof จึงอาจเรียกชื่ออีกชื่อหนึ่งว่า Embden-Mayerhof pathway
- เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ O_2
- เกิดขึ้นในไซโตพลาสซึมและพบในเซลล์ทุกเซลล์เนื้อเยื่อของร่างกาย

$$\text{Glucose} + 2\text{NAD}^+ + 2\text{ADP} + 2\text{P}_i \longrightarrow 2\text{Pyruvate} + 2(\text{NADH} + \text{H}^+) + 2\text{ATP} + 2\text{H}_2\text{O}$$

ในสภาพไม่มีออกซิเจนได้ ATP = 2 โมล/Glucose 1 โมล

- ในสภาพที่มีออกซิเจน NADH จะถูกออกซิไดซ์ให้เป็น NAD ซึ่งเกิดขึ้นในไมโตคอนเดรีย (Mitochondria) ได้พลังงาน 3 ATP/NADH 1 โมล

Glucose 1 mol จะผลิตพลังงาน ATP = 8 mol

บุญล้อม (2546)

การเปลี่ยนไพรูเวทให้เป็นอะซิติล โคเอ (Acetyl CoA)

- ไพรูเวทที่เกิดขึ้นจากวิถีไกลโคไลซีส (อยู่ในไซโตพลาสซึม) จะถูกย้ายเข้าไปในไมโตคอนเดรีย
- ในไมโตคอนเดรียจะเกิดการออกซิไดซ์ในสภาพที่มีออกซิเจน

$$\text{Pyruvate + Co-enzyme A} \xrightarrow[\text{NAD}^+ \;\rightarrow\; \text{NADH + H}^+]{\text{Thiamin diphosphate}} \text{Acetyl Co A + Co}_2$$

- มี Thiamin diphosphate เป็นโคเอนไซม์ ดังนั้น การขาดวิตามินบี$_1$ จะมีผลกระทบต่อการสลายคาร์โบไฮเดรต

บุญล้อม (2546)

วัฏจักรเครบส์ (Krebs' cycle)

- หรือ วัฏจักรกรดไตรคาร์บอกซิลิก (Tricarboxylic acid cycle)
- หรือ วัฏจักรกรดซิตริก (Citric acid cycle)
- เป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจน เกิดใน ไมโตคอนเดรีย

$$\text{Acetyl CoA} + 3NAD^+ + FAD + GDP + P_i + H_2O$$

$$\downarrow$$

$$2CO_2 + 3NADH + 3H^+ + FADH_2 + GTP + CoASH$$

การออกซิไดซ์ Acetyl CoA ให้เป็น CO_2 และ H_2O ในวัฏจักรเครบส์ จะได้

ATP = 12 โมล/ Acetyl CoA 1 โมล

บุญล้อม (2546)

ประสิทธิภาพในการเผาผลาญกลูโคสในร่างกาย

- พลังงานที่ได้จากการออกซิไดซ์กลูโคส 1 โมลในร่างกายจะได้พลังงาน = **38 ATP**
  - ATP 1 โมลจะให้พลังงาน = 8.3 Kcal (34.7 KJ)
  - กลูโคส 1 โมลจะได้พลังงาน = 315.4 Kcal (1,320 KJ)
- กลูโคสให้พลังงานอิสระสุทธิ (Bomb) 686 Kcal (2,870 KJ)

ร่างกายสามารถใช้พลังงานอิสระจากกลูกโคสได้ = (315.4 x 100) / 686 = 46%

พลังงานส่วนที่เหลือจะสูญเสียไปในรูปของความร้อนที่เพิ่มขึ้น (Heat increment)

บุญล้อม (2546)

การเปลี่ยนไพรูเวทในสภาพไร้ออกซิเจน

- ในสภาพไร้ O_2 เช่น ในสภาวะที่ร่างกายทำงานหนัก ทำให้ O_2 ที่หายใจเข้าไปไม่เพียงพอกับความต้องการ สภาวะนี้เรียกว่า **ออกซิเจนเดท (Oxygen debt)**
- NADH ไม่สามารถเปลี่ยนเป็น NAD^+ โดยกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนได้
- NADH จึงต้องถูกเปลี่ยนเป็น NAD โดยการเปลี่ยน Pyruvate ให้เป็น Lactate
- การเปลี่ยนกลูโคสในสภาพไร้ O_2 จะได้พลังงานเพียง 2 ATP/กลูโคส 1 โมล
- **ปฏิกิริยานี้ จะทำให้เกิดการเมื่อยล้า เนื่องจากมี Lactate สะสมอยู่ในกล้ามเนื้อมาก**
- แต่เมื่อได้รับ O_2 เพียงพอ เช่น การพักผ่อน นอนหลับ ฯลฯ กล้ามเนื้อจะเปลี่ยน Lactate กลับมาเป็น Pyruvate ได้ NADH เพื่อเปลี่ยนพลังงานในห่วงโซ่หายใจต่อไป...

บุญล้อม (2546)

การสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต

- **Gluconeogenesis** เป็นกระบวนการสร้างกลูโคส จาก สารตัวกลางที่ได้จากการเมตาบอไลซ์คาร์โบไฮเดรต โปรตีน หรือ ไขมัน...
- เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ วิถีไกลโคไลซีส (Glycolysis)
- เกิดขึ้นที่ตับ และบางส่วนที่ไต เกิดขึ้นเมื่อ...
  - ร่างกายได้รับคาร์โบไฮเดรตจากอาหารไม่เพียงพอ หรือ
  - ร่างกายต้องการกำจัดสารที่ได้จากที่ได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึมออกเมื่อร่างกายไม่ต้องการ เช่น
    - แลคเตทที่เกิดในกล้ามเนื้อ
    - กลีเซอรอลในเนื้อเยื่อไขมัน และ
    - กรดอะมิโนเหลือใช้
- เปลี่ยนเป็นกลูโคส แล้วเผาผลาญเป็นพลังงาน.....

บุญล้อม (2546)

- สารที่สามารถสร้างกลูโคสได้ เรียกว่า **Glucogenic substance** ได้แก่ Glycerol, Lactate, Propionic acid, Amino acid
- สารที่ไม่สามารถสร้างกลูโคส แต่...เปลี่ยนเป็น Acetyl CoA หรือ Acetoacetate และจะถูกเปลี่ยนเป็น Ketone ได้ เรียกว่า **Ketogenic substance** เช่น... Fatty acid, Leucine, Lysine
- กรดอะมิโนบางชนิด เช่น... Isoleucine, Phenylalanine, Tryptophan และ Tyrosine เป็นได้ทั้ง **Glucogenic และ Ketogenic substance**

บุญล้อม (2546)

- **Glycogenesis** เป็นปฏิกิริยาสังเคราะห์ไกลโคเจนจากนำกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α(1→4) และ α(1→6)
- เกิดขึ้นในทุกเนื้อเยื่อของร่างกาย แต่ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ตับและกล้ามเนื้อ

บุญล้อม (2546)

โปรตีน (Protein)

- **โปรตีน** เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ มีน้ำหนักมาก ประกอบด้วย**กรดอะมิโน**มาเรียงต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ (Peptide bond) เกิดเป็นสายเพปไทด์ (Peptide chain)
- **โปรตีน** ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังอาจจะมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบด้วย องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในโปรตีน...

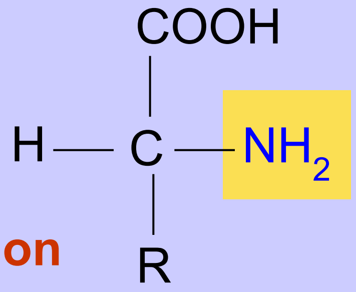
C 51 – 55%	O 21 – 23.5%
H 6.5 – 7.3%	N 15.5 – 18%
S 0.5 – 2.0%	P 0 – 1.5%

- โปรตีนพบในโปรโทพลาสซึม (Protoplasm) ของเซลล์สิ่งมีชีวิต สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีโปรตีนเฉพาะของตนเอง **ในเซลล์และเนื้อเยื่อก็มีโปรตีนหลายแบบ...**
- โปรตีนเมื่อถูกย่อยด้วยกรด หรือด่าง จะได้กรดอะมิโน (Amino acid) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของโปรตีน ในธรรมชาติ มีกรดอะมิโนมากกว่า 200 ชนิด แต่ที่เป็นองค์ประกอบในอาหารสัตว์มีเพียง 20 ชนิดเท่านั้น

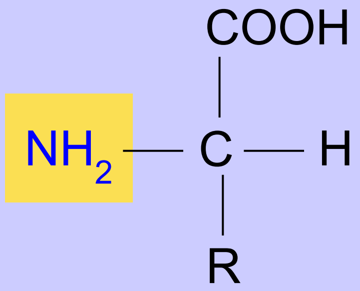
บุญล้อม (2546)

กรดอะมิโน (Amino acid)

- กรดอะมิโน ประกอบด้วย...
  - หมู่อะมิโน ($-NH_2$) และ
  - หมู่คาร์บอกซิล (-COOH)
- กรดอะมิโนมีโครงสร้างได้ 2 แบบคือ D และ L โดยดูจากหมู่ $-NH_2$



L-configuration



D-configuration

เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นรูปที่ร่างกายนำไปใช้ประโยชน์ได้ **(Biological active)**

พบได้บ้างในผนังเซลล์แบคทีเรียและยาปฏิชีวนะ

บุญล้อม (2546)

การจำแนกกรดอะมิโนตามองค์ประกอบทางเคมี แบ่งเป็น 5 กลุ่ม...

1) **กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและเป็นกลาง** (Aliphatic monoamino monocarboxylic amino acids) อาจจะแตกแขนงบ้าง แต่มีหมู่อะมิโน (NH_2) และหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) อย่างละหมู่ ได้แก่...

ไกลซีน (Glycine)	วาลีน (Valine)
ลิวซีน (Leucine)	เซอรีน (Serine)
ธรีโอนีน (Threonine)	ไอโซลิวซีน (Isoleucine)

บุญล้อม (2546)

2) **กลุ่มที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (Sulfur amino acids)** ได้แก่ ... เมทไธโอนีน (Methionine) ซีสเตอีน (Cysteine) และซีสตีน (Cystine

- เมทไธโอนีนเป็นกรดอะมิโนที่สำคัญในการให้หมู่เมทธิล ($-CH_3$) กับสารอื่นในกระบวนการ Metabolism
- ซีสตีน ประกอบด้วย ซีสเตอีน 2 โมเลกุลจับกันด้วยพันธะไดซัลไฟล์ (Disulfide bond)

บุญล้อม (2546)

3) **กลุ่มที่มีคุณสมบัติเป็นกรด** (Acidic amino acids หรือ dicarboxylic amino acids) คือ กรดอะมิโนที่มีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) 2 หมู่ ได้แก่...

- กรดแอสพาร์ติก (Aspartic acid หรือ Aspartate)
- กรดกลูตามิก (Glutamic acid หรือ glutamate

พบมากในโปรตีนของเมล็ดพืช

บุญล้อม (2546)

4) กลุ่มที่มีคุณสมบัติเป็นเบส (Basic amino acids) คือกรดอะมิโนที่มีหมู่อะมิโนมากกว่า 1 หมู่ ได้แก่...

- อาร์จินีน (Arginine)
- ไลซีน (Lysine)
- ฮีสติดีน (Histidine)

บุญล้อม (2546)

5) **กลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน** (Aromatic and heterocyclic amino acids) ได้แก่...

- เฟนิลอะลานีน (Phenylalanine)
- ไทโรซีน (Tyrosine)
- ทริปโตเฟน (Tryptophan)

} วงแหวนเป็นแบบเบนซีน

- โปรลีน (Proline)
- ฮีสติดีน (Histidine)

} วงแหวนเป็นแบบอะโรเมติก

ฮีสติดีน จัดอยู่ใน 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่เป็นเบส เนื่องจากมีหมู่อะมิโน 2 กลุ่ม และกลุ่มโครงสร้างวงแหวน

บุญล้อม (2546)

การจำแนกกรดอะมิโนตามความจำเป็นต่อสัตว์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม...

1) **กรดอะมิโนที่จำเป็น หรือขาดไม่ได้** (Essential or indispensable amino acids, EAA) หมายถึง...

กรดอะมิโนที่ร่างกายสัตว์ชั้นสูงสร้างไม่ได้ หรือสร้างได้ไม่เพียงพอกับความต้องการของร่างกาย จำเป็นต้องได้รับจากอาหาร ถ้าขาดจะทำให้เกิดอาการผิดปกติได้ มี 10 ชนิด...

1) อาร์จินีน (Arginine)
2) ฮีสติดีน (Histidine)
3) ไอโซลิวซีน (Isoleucine)
4) ลิวซีน (Leucine)
5) ไลซีน (Lysine)
6) เมทไธโอนีน (Methionine)
7) เฟนิลอะลานีน (Phenylalanine)
8) ธรีโอนีน (Threonine)
9) ทริปโตเฟน (Tryptophane)
10) วาลีน (Valine)

บุญล้อม (2546)

2) กรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น (Non essential or dispensable amino acids) หมายถึง...

กรดอะมิโนที่ร่างกายสัตว์สามารถสร้างได้อย่างเพียงพอ หรือ ถ้าขาดก็ไม่ทำให้เกิดอาการผิดปกติ เพราะร่างกายสามารถสร้างได้จากกรดอะมิโนชนิดอื่น หรือสารประกอบอื่น... ได้แก่...

1) อะลานีน (Alanine)
2) กรดแอสพาร์ติก (Aspartic acid)
3) แอสพาราจีน (Asparagine)
4) ซีสเตอีน (Cysteine)
5) กรดกลูตามิก (Glutamic acid)
6) กลูตามีน (Glutamine)
7) ไกลซีน (Glycine)
8) โปรลีน (Proline)
9) เซอรีน (Serine)
10) ไทโรซีน (Tyrosine)

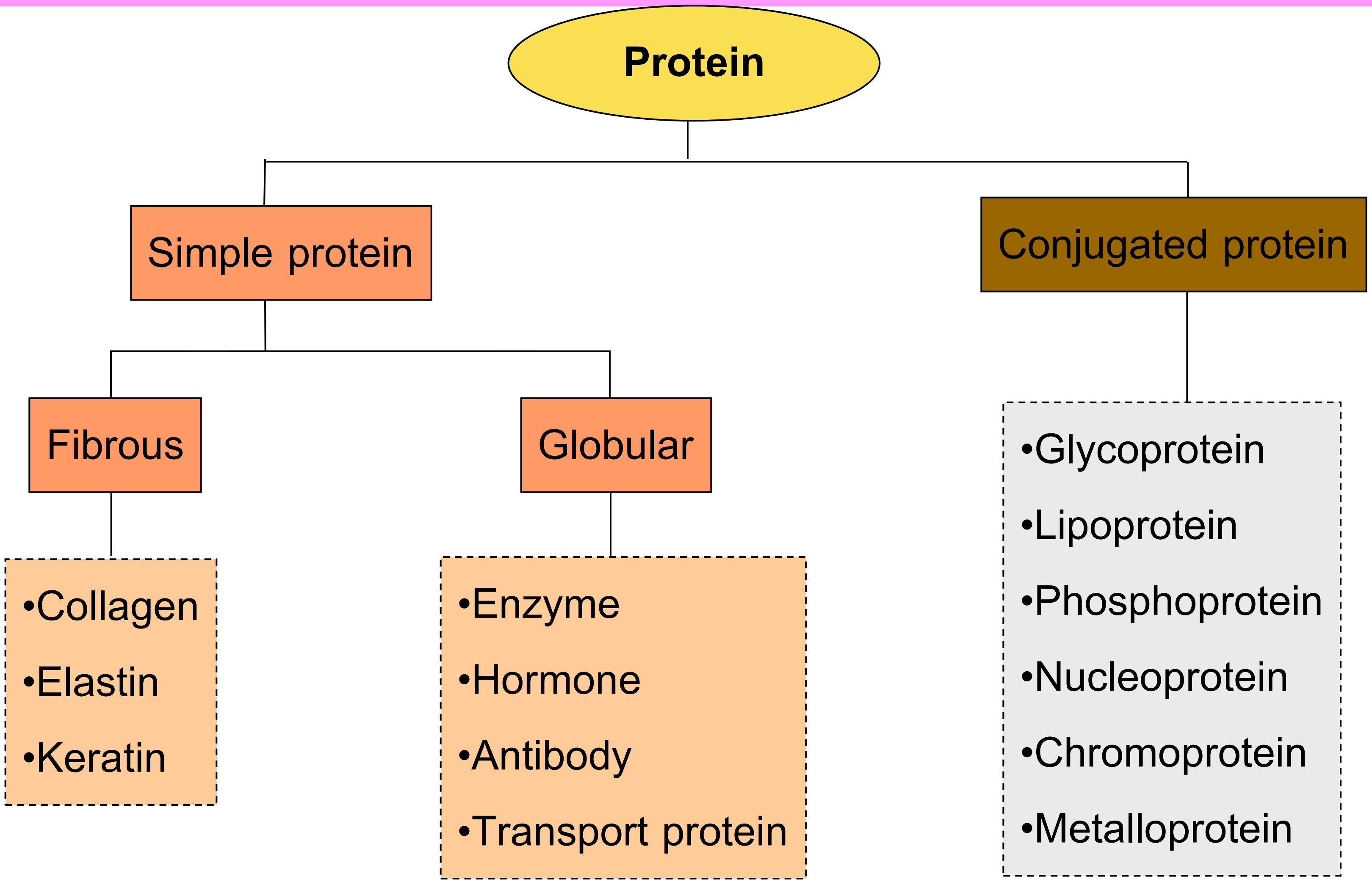
บุญล้อม (2546)

กรดอะมิโนไม่จำเป็นบางชนิดสามรถใช้ทดแทนกรดอะมิโนที่จำเป็นบางส่วนได้ กรณีนี้ เรียกว่า **Sparing effect** ซึ่งกันและกัน เช่น...

ซีสตีน	สามารถใช้ทดแทน	เมทไธโอนีน ได้ 50%
ไทโรซีน	สามารถใช้ทดแทน	เฟนิลอะลานีน ได้ 30%

บุญล้อม (2546)

การจัดจำแนกโปรตีน



บุญล้อม (2546)

1. โปรตีนเชิงเดี่ยว (Simple protein)

- ประกอบด้วยกรดอะมิโนเท่านั้น ไม่มีสารอื่นปะปน
- แบ่งเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการละลายได้...
  - โปรตีนเส้นใย (Fibrous protein)
  - โปรตีนกลอบูร่า (Globular protein)

บุญล้อม (2546)

โปรตีนเส้นใย (Fibrous protein)

มีโครงสร้างเพปไทด์เป็นเส้นยาวหลายเส้นเรียงกันตัวแบบขนานกัน มีความแข็งแรง บางชนิดมีความยืดหยุ่นสูง แต่บางชนิดไม่ยืดหยุ่น มักทำหน้าที่เป็นโครงสร้าง ไม่ละลายในน้ำหรือสารละลายเกลือ และทนต่อการย่อยโดยน้ำย่อยของสัตว์ ได้แก่....

- **Collagen** เป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน
- **Elastin** มีลักษณะยืดหยุ่น พบในเส้นเอ็นและเส้นเลือด
- **Keratin** เป็นองค์ประกอบของขน ผม หนัง จะงอยปาก และเกล็ดในสัตว์เลื้อยคลาน มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบด้วย

บุญล้อม (2546)

โปรตีนกลอบูร่า (Globular protein)

- มีลักษณะเป็นก้อน อาจเป็นทรงกลม ทรงรี หรือรูปไข่ก็ได้ โดยมีสายเพปไทด์พันกันไปมา แต่ไม่อัดแน่น มีช่องว่างในโมเลกุล ทำให้น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปได้ จึงมีความสามารถอุ้มน้ำและกระจายตัวได้ดีในน้ำ ได้แก่....
  - แอนติบอดี (Antibody)
  - ฮอร์โมนบางชนิด
  - เคซีนในน้ำนม
  - ไมโอโกลบินในกล้ามเนื้อ
  - ฮีโกลบินในเลือด
  - อัลบูมิน
  - โกลบูลิน

บุญล้อม (2546)

2. โปรตีนเชิงซ้อน (Conjugated protein)

ในโมเลกุลจะประกอบด้วยกรดอะมิโนและส่วนที่ไม่ใช่โปรตีน มีหลายประเภท ได้แก่...

- **Glycoprotein** โปรตีนรวมกับคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ โอโวมิวซิน (Ovomucin) ในไข่ขาว
- **Lypoprotein** โปรตีนรวมกับลิพิด พบใน ผนังเซลล์ของสัตว์ ไข่แดง และพลาสม่า
- **Phosphoprotein** โปรตีนรวมกับหมู่ฟอสเฟต พบใน น้ำนม ไข่แดง
- **Nucleoprotein** โปรตีนรวมกับกรดนิวคลีอิก ได้แก่ DNA RNA พบในนิวเคลียสและไรโบโซม
- **Chromoprotein** โปรตีนรวมกับสารสี เช่น ฮีโมโกลบิน และไมโอโกลบิน
- **Metalloprotein** โปรตีนรวมกับโลหะ เช่น ฮีโมโกลบินและไมโอโกลบินมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบ

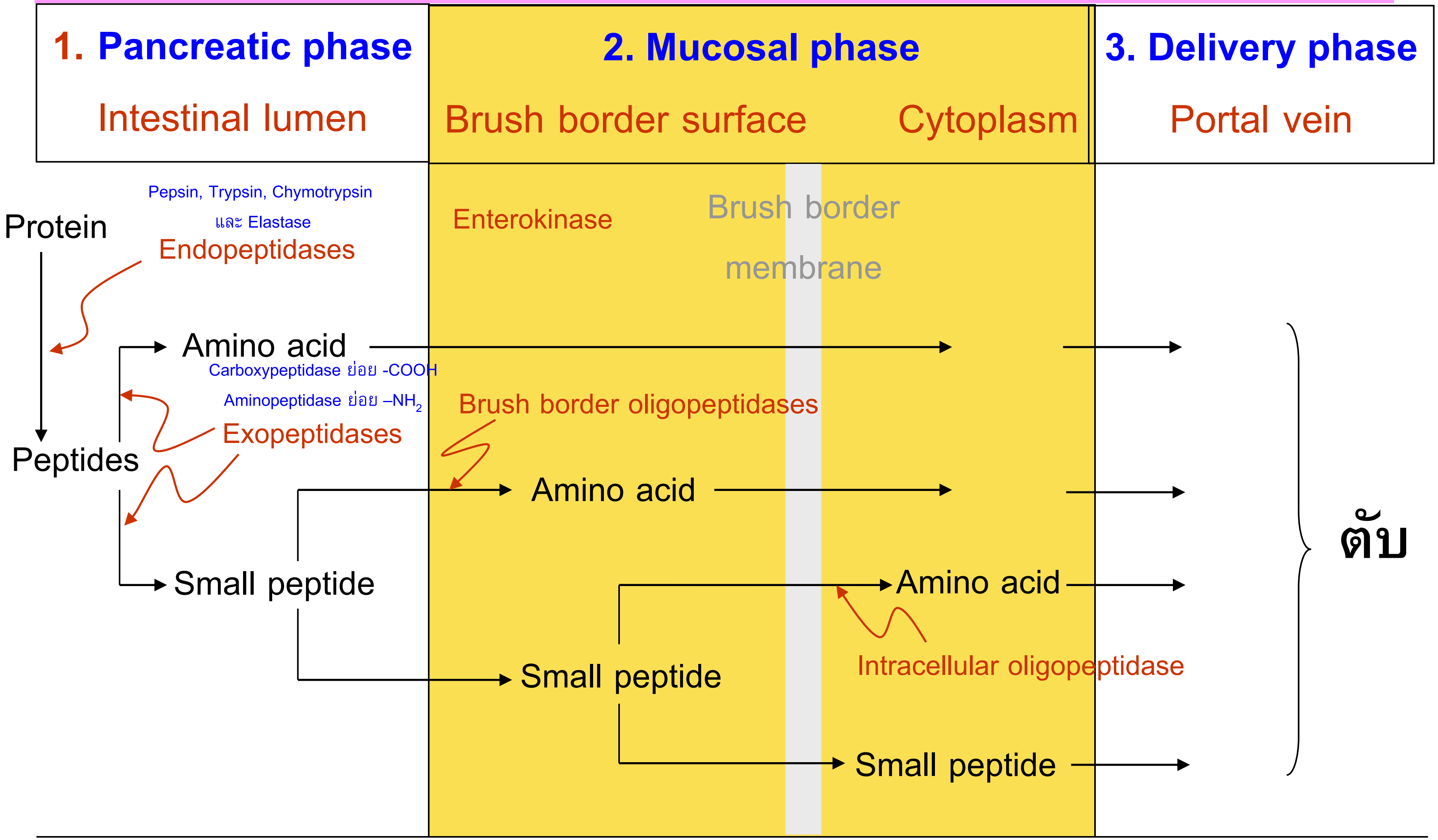
บุญล้อม (2546)

คุณภาพของโปรตีน

- โดยทั่วไปจะพิจารณาจาก
  - การย่อยได้
  - ปริมาณและสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็น
- กรดอะมิโนที่มักขาดเสมอ เรียกว่า **Limiting amino acid**
  - ในสัตว์ปีก พบว่า มักขาดเมทไธโอนีนเป็นอันดับแรก (First limiting amino acid) และไลซีนเป็นอันดับ 2 (Second limiting amino acid)

บุญล้อม (2546)

การย่อยและการดูดซึมโปรตีน



Active transport with Na^+

ที่มา: เพทาย (2538)

การดูดซึมกรดอะมิโน

- การเคลื่อนย้ายกรดอะมิโนผ่านผนังสำไส้ใช้วิธี **Active transport** โดยใช้ Na^+ เป็นตัวพา
- กรดอะมิโนในรูป L-configuration จะดูดซึมได้ดีกว่า D-configuration
- การขจัดหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) โดยการฟอร์ม Ester หรือการทำให้ประจุของกรดอะมิโนหายไปโดยกระบวนการ Acetylation หรือการทำให้เกิดประจุใน Side chain ของกรดอะมิโนบางชนิด เพื่อให้เกิด Active transport จะมีผลทำให้ไปขัดขวางการเกิด Active transport ของกรดอะมิโนตัวอื่นได้ เกิดการแก่งแย่งกันดูดซึมเรียกว่า **Antagonism**

พันทิพา (2543)

ตัวอย่างกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์แข่งขันกันดูดซึม

- Arginine, Cystine และ Ornithine จะยับยั้งการดูดซึม Lysine
- Arginine, Lysine และ Ornithine จะยับยั้งการดูดซึม Cystine
- กรดอะมิโนที่เป็นกลาง (Neutral amino acid) จะไปยับยั้งกรดอะมิโนที่เป็นเบส (Basic amino acid)
- แต่ Basic amino acid จะไม่ยับยั้ง Neutral amino acid

พันทิพา (2543)

ผลหลังจากการดูดซึม...

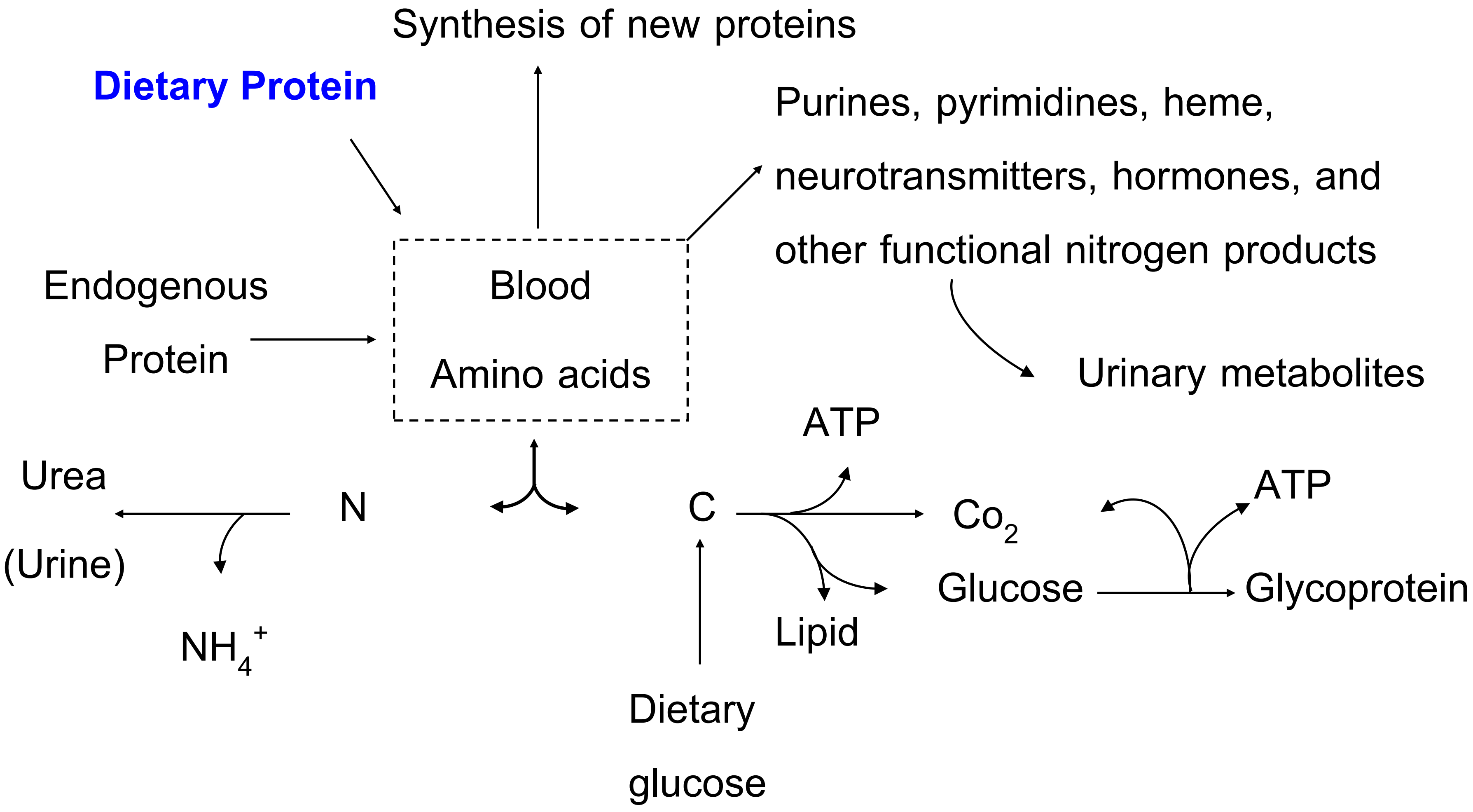
1) ถูกนำไปสังเคราะห์เป็นโปรตีน (บุญล้อม (2546 หน้า177)

2) ถูกนำไปสังเคราะห์เป็นเอนไซม์ ฮอร์โมน และสาร Metabolites ตัวอื่น

3) การใช้กรดอะมิโนเป็นแหล่งพลังงาน โดยเกิดกระบวนการ Deamination หรือ Transamination และส่วนของคาร์บอนจะถูกนำไปใช้เพื่อให้เกิดพลังงาน (บุญล้อม (2546 หน้า152)

พันทิพา (2543)

การสลายโปรตีน



ที่มาและการเปลี่ยนแปลงกรดอะมิโนในกระแสเลือด บุญล้อม (2546)

การใช้กรดอะมิโนเป็นพลังงาน

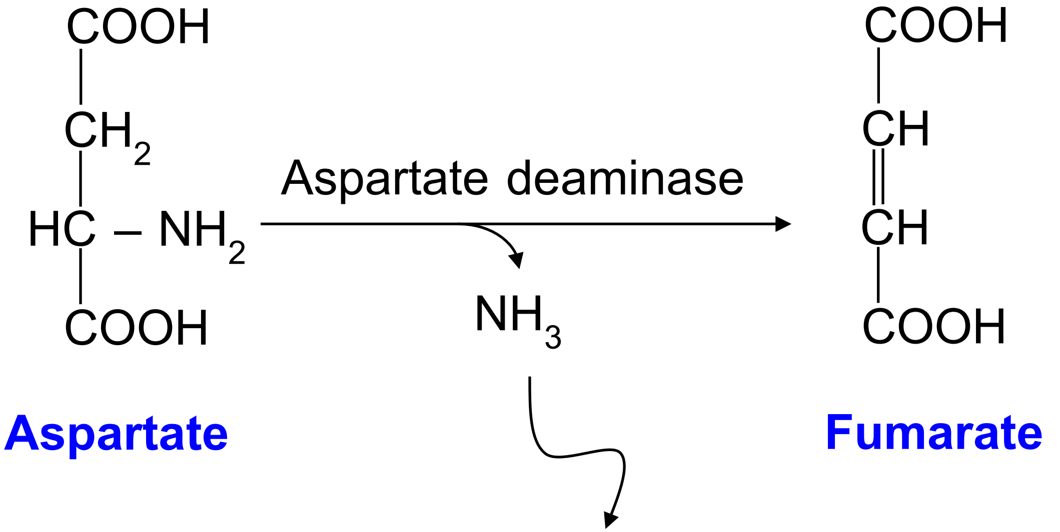
- ในภาวะร่างกายขาดพลังงาน จะมีการสลายกรดอะมิโนเป็นพลังงาน โดยปฏิกิริยาการดึงหมู่อะมิโนออกด้วยกระบวนการ
  - Oxidative deamination
  - Non-oxidative deamination

    } (การขจัดหมู่อะมิโน)
  - Transmination (การย้ายหมู่อะมิโน)

บุญล้อม (2546)

กระบวนการ Deamination

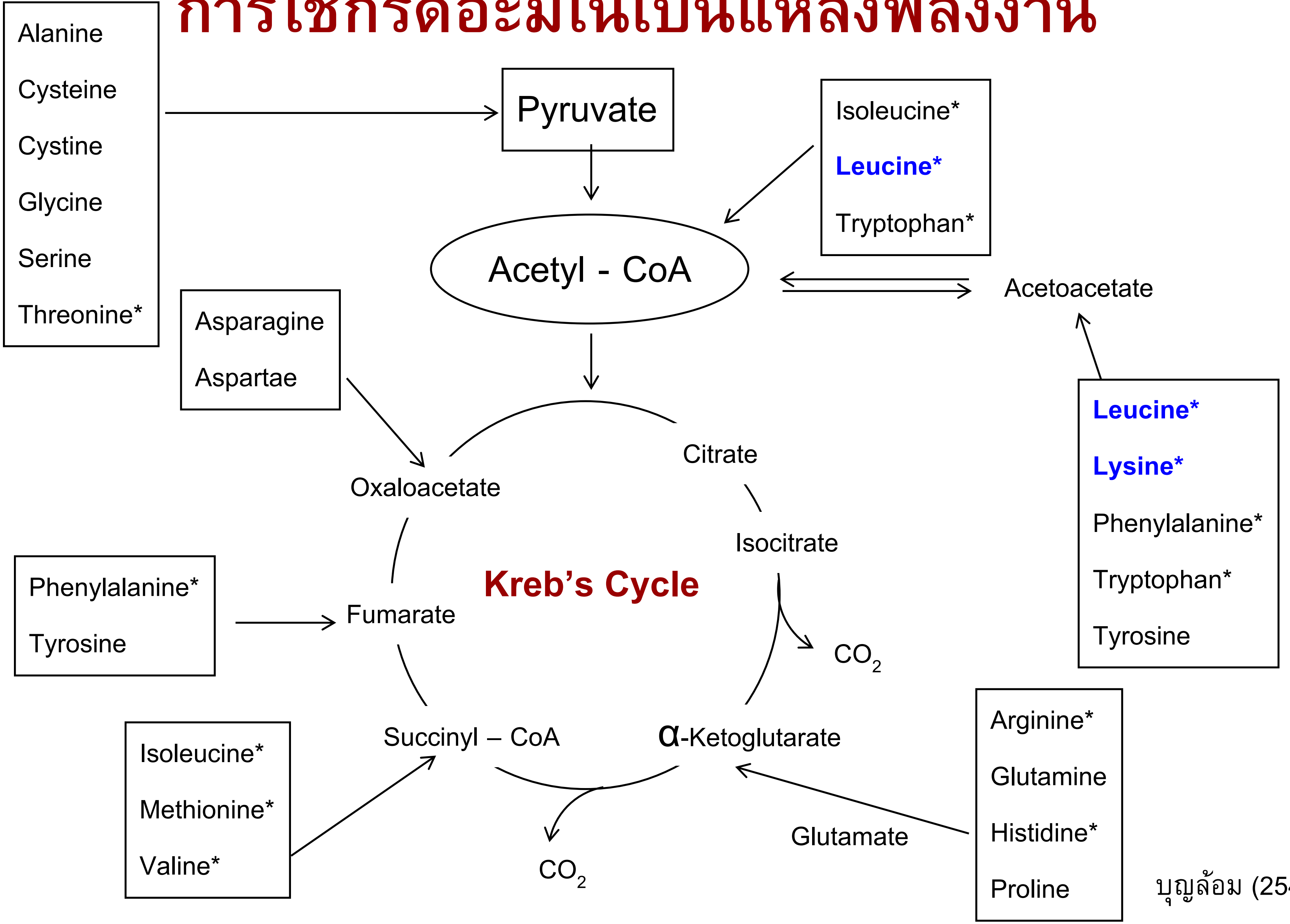
- เกิดขึ้นที่**ตับ** มากกว่า ที่ไต
- ต้องใช้เอนไซม์ Deaminase ที่เฉพาะเจาะจง เช่น...



(แอมโนเนีย (NH_3) เป็นพิษต่อร่างกาย จะต้องกำจัดออกโดยอาศัยวัฏจักรยูเรีย)

บุญล้อม (2546)

การใช้กรดอะมิโนเป็นแหล่งพลังงาน



บุญล้อม (2546)

Glucogenic amino acid

- เป็นกรดอะมิโนที่เปลี่ยนเป็นตัวกลาง...
  - Pyruvate
  - Oxaloacetate
  - Fumarate
  - Succinyl-CoA
  - α-Ketoglutarate

บุญล้อม (2546)

Ketogenic amino acid

- กรดอะมิโนที่เปลี่ยนเป็นตัวกลาง...
  - Acetyl-CoA
  - Acetoacetyl-CoA

} เปลี่ยนเป็นสาร Ketone หรือ ไขมัน

บุญล้อม (2546)

วัฏจักรยูเรีย (Urea cycle)

- การสลายหรือกำจัดกรดอะมิโน โดยปฏิกิริยา Deamination จะได้แอมโมเนียมอิออน หรือ แอมโมเนีย (NH^{+}_{4})
  - **มีฤทธิ์เป็นด่าง** ถ้ามีมากจะเป็นอันตรายต่อเซลล์ เนื่องจากจะทำให้ pH ของเลือดและน้ำเลี้ยงเซลล์สูงกว่า 7.4 ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้
  - ร่างกายจะต้องกำจัดแอมโนเนียมอิออนออก โดยเปลี่ยนเป็นยูเรียที่ตับ
  - ขับออกจากร่างกายในรูปปัสสาวะ (สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม) หรือกรดยูริก (ในสัตว์ปีกหรือสัตว์เลื้อยคลาน)

บุญล้อม (2546)

กรดไขมันและไขมัน

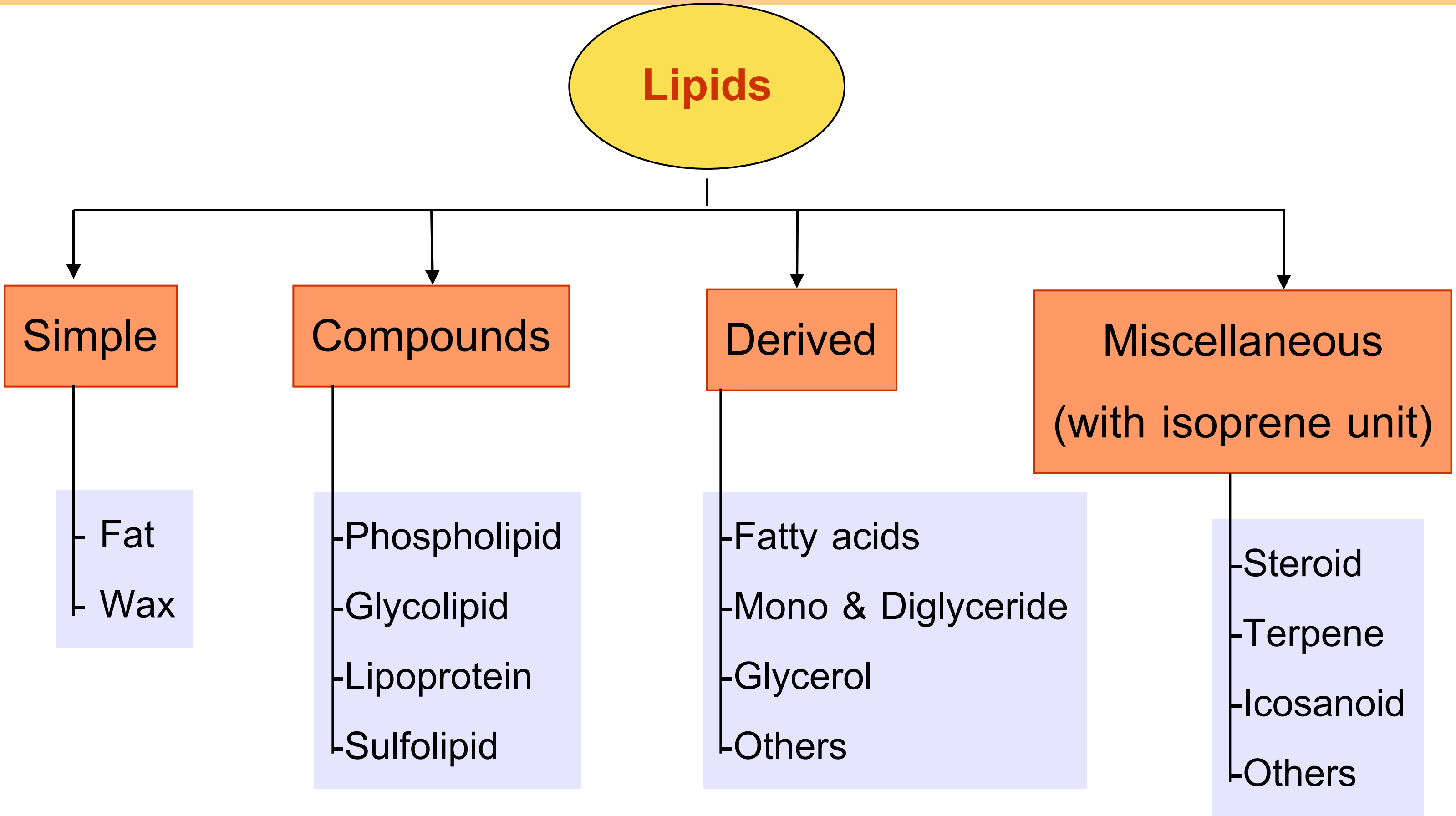
- **ไขมันเป็นลิปิดชนิดหนึ่ง... ลิปิด (Lipid)** หมายถึง ไขมันและสารที่คล้ายไขมัน ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), และออกซิเจน (O) เป็นหลัก โดยทั่วไปลิพิดจะมีจำนวน O น้อยกว่าจำนวน C และ H มาก ในลิพิดบางชนิด อาจมีธาตุ P และ N เป็นองค์ประกอบบ้าง...
- **ลิปิด** เป็นสารอินทรีย์ที่พบได้ในเนื้อเยื่อพืชและสัตว์ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว (Apolar solvent) หรือมีขึ้นเล็กน้อย เช่น... เบนซีน (Benzene), ไดเอทธิลอีเธอร์ (Diethylether), คลอโรฟอร์ม (Chloroform), ไดคลอโรมีเธน (Dichloromethane), แอลกอร์ฮอล์ (Alcohol) และอะซิโตน (Acetone) ฯลฯ.
  - **ยกเว้น** กรดไขมันสายสั้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีจำนวน C 2-6 อะตอม เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก จะละลายน้ำได้ดี ถ้ามีจำนวน C 6-10 อะตอม จะละลายน้ำได้เล็กน้อย แต่ถ้ามีจำนวน C มากกว่า 12 อะตอมจะไม่ละลายน้ำ..

บุญล้อม (2546)

- ในทางโภชนศาสตร์ มักเรียก **ลิปิด เป็นภาษาไทยง่าย ๆ ว่า ไขมัน** ซึ่งไม่ค่อยจะถูกต้องนัก เพราะไขมันมีความหมายแคบกว่า...
- **ไขมัน** หมายถึง พวกไตรเอซิลกลีเซอรอล หรือ ไตรกลีเซอรไรด์ (Triacylglycerol or Triglycerides) ซึ่งเป็นลิพิดธรรมดา (Simple lipid)
- หากอยู่ในสภาพแข็งที่อุณหภูมิห้อง (จุดหลอมเหลวสูงกว่า 15 °C) เรียกว่า **ไขมัน (Fat)** แต่ถ้าหากอยู่ในสภาพเหลวที่อุณหภูมิห้อง (จุดหลอมเหลวสูงกว่า 15 °C เรียกว่า **น้ำมัน (Oil)** (พันทิพา, 2543)
- ไขมันเป็นแหล่งสะสมพลังงานในสัตว์ ไขมันเป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อไขมัน (Adipose tissue) ถึง 97%
  - ไขมันให้พลังงานมากกว่าไกลโคเจน (คาร์โบไฮเดรตในสัตว์) ประมาณ 2.25 เท่า (39 & 17 MJ/kg DM.)

บุญล้อม (2546)

ประเภทของลิปิด



บุญล้อม (2546)

กรดไขมัน (Fatty acid)

- กรดไขมันประกอบด้วย C ต่อกันเป็นสาย โดยอาจจะแตกแขนงหรือไม่แตกแขนงก็ได้ มีจำนวน C ตั้งแต่ 2-24 หรืออาจจะมากกว่านั้น ตรงปลายด้านหนึ่งจะมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH)
- กรดไขมันมีสูตรโครงสร้างทั่วไปว่า R-COOH โดย R เป็นตัวแทนของจำนวน C เช่น...

R- เป็น	ชื่อกรดไขมัน	สูตร
CH_3	Acetic acid	CH_3-COOH
C_2H_5	Propionic acid	CH_3-CH_2-COOH
C_3H_7	Butyric acid	CH_3-CH_2-CH_2-COOH

บุญล้อม (2546)

กรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว

- **กรดไขมันอิ่มตัว** (Saturated fatty acid)... C อะตอม (ยกเว้นหมู่คาร์บอกซิล, -COOH) จะมี H 2 อะตอมมาเกาะอยู่ ($-CH_2-$) และต่อกันเป็นเส้นยาวหรือแตกกิ่งไปเรื่อย ๆ ยกเว้น ตรงส่วนปลายสุดท้ายจะมี H เกาะอยู่ 3 อะตอม ($-CH_3$) ดังนั้น พันธะ (Bond) ที่ยึดต่อระหว่าง C อะตอม ด้วยกันจะเป็นพันธะเดี่ยว
- **กรดไขมันไม่อิ่มตัว** (Unsaturated fatty acid)...C อะตอม ที่ต่อกันด้วยพันธะคู่ ตั้งแต่ 1 คู่ขึ้นไป เนื่องจาก... H อะตอมถูกขจัดออกไปจากโมเลกุล ตย.เช่น Linoleic acid จัดเป็น **Polyunsaturated fatty acid** เพราะมีพันธะคู่ (Double bond) จำนวน 2 คู่

$$CH_3\,(CH_2)_4\,CH = CH - CH_2 - CH = CH - (CH_2)_7\,COOH$$

พันทิพา (2543)

รูปแบบของพันธะคู่

- การมีพันธะคู่ในกรดไขมันทำให้เกิดโครงสร้างได้ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของ H อะตอม ที่มาเกาะกับ C อะตอม ที่พันธะคู่นั้น
  - ถ้า H อะตอม อยู่ข้างเดียวกันของพันธะคู่ กรดไขมันนั้นจะเป็น **แบบซีส (*cis*-form)**
  - ถ้า H อะตอมอยู่คนละข้างกันจะเป็น **แบบทรานส์ (*trans*-form)**
- **กรดไขมันที่เกิดตามธรรมชาติส่วนมากจะอยู่ในรูปแบบซีส** แต่อาจจะพบรูปแบบทรานส์บ้างระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์กรดไขมัน

บุญล้อม (2546)

ตัวอย่างกรดไขมันที่มีพันธะคู่...

$$\begin{array}{l} H - C - (CH_2)_7 - CH_3 \\ \quad\;\; \| \\ H - C - (CH_2)_7 - COOH \end{array}$$

Oleic acid (*cis*-form)

Elaidic acid (*trans*-form)

$$\begin{array}{r} CH_3 - (CH_2)_7 - C - H \quad\quad\quad\quad\quad\quad \\ \| \quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\; \\ H - C - (CH_2)_7 - COOH \end{array}$$

กรดไขมัน $C_{18} : 1\ \Delta^{9}$

พันทิพา (2543)

กรดไขมันที่จำเป็น (Essential fatty acid)

- **กรดไขมันที่จำเป็น** หมายถึง... กรดไขมันที่ร่างกายสัตว์ชั้นสูงไม่สามารถสร้างได้ หรือสร้างได้ไม่เพียงพอกับความต้องการ จำเป็นต้องได้รับจากอาหาร ถ้าขาดจะทำให้เกิดโรคหรืออาการผิดปกติ
  - **กรดไขมันที่จำเป็น มี 3 ชนิด** คือ
    - Linoleic acid (ลิโนเลอิก) C18 : 2 ($\Delta^{9, 12}$)
    - Linolenic acid (ลิโนเลนิก) C18 : 3 ($\Delta^{9, 12, 15}$)
    - Arachidonic aacid (อะราชิโดนิก) C20 : 4 ($\Delta^{5, 8, 11, 14}$)
  - **พบว่า...**
    - Arachidonic acid และ γ-Linolenic acid สามารถสร้างได้ในร่างกายจาก Linoleic acid
    - Linoleic acid และ α-Linilenic acid ร่างกายสร้างเองไม่ได้เลย

พันทิพา (2543) และ บุญล้อม (2546)

การนับตำแหน่งคาร์บอนและสัญลักษณ์

1. การนับตำแหน่งคาร์บอน นับได้หลายวิธี
   1. **การนับเลข** นับจากหมู่คาร์บอกซิลเป็นตำแหน่งที่ 1 และให้สัญลักษณ์พันธะคู่เป็นเดลต้า (Δ) เช่น
      - กรดโอเลอิก (Oleic acid) ใช้สัญลักษณ์ว่า 18:1 Δ^{9} แสดงว่า เป็นกรดไขมันที่มี C 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 คู่ อยู่ระหว่าง C ตำแหน่งที่ 9 และ 10
      - กรดอัลฟาลิโนเลนิก (α-linolenic acid) ใช้สัญลักษณ์ว่า 18:3 $\Delta^{9, 12, 15}$ แสดงว่า เป็นกรดไขมันที่มี C 18 อะตอม มีพันธะคู่ 3 คู่ ระหว่าง C ตำแหน่งที่ 9 และ 10, 12 และ 13, และ 15 และ 16 ตามลำดับ

บุญล้อม (2546)

2. **การนับสัญลักษณ์** โดย

1. **นับจากปลายคาร์บอกซิล** โดยนับจาก C ตำแหน่งที่ 2, 3, 4 ที่ถัดจากหมู่คาร์บอกซิลเข้ามาเป็น อัลฟา (α), เบต้า (β), แกรมม่า (γ) และเดลต้า (δ) ตามลำดับ
2. **นับจากปลายเมทิล** (CH_3) โดยเรียกว่า โอเมก้า (Omega, ω) ซึ่งเป็นพยัญชนะตัวสุดท้ายของภาษาละติน เนื่องจากกรดไขมันที่มีพันธะคู่หลายคู่แต่ละพันธะมักจะอยู่ห่างกัน 3 C ดังนั้น การระบุค่าโอเมก้าจึงนับเฉพาะพันธะคู่แรกจาก**ปลายเมทิล**เท่านั้น ไม่ต้องนับตำแหน่งอื่นอีก

- การนับแบบนี้อาจทำให้กรดไขมันหลายชนิดอยู่ในกลุ่มเดียวกันได้

บุญล้อม (2546)

ตัวอย่าง

•18 •1

•CH_3-CH_2-CH=CH-CH_2-CH=CH-CH_2-CH=CH-$(CH_2)_4$-CH_2-CH_2-CH_2-COOH

•ω •Σ •δ •γ •β •α

•ชื่อสามัญ : α-linoleic acid ชื่อตามระบบ : Octadecatrienoic

•สัญลักษณ์ : 18:3 $\Delta^{9,12,15}$ อยู่ในกลุ่ม : ω3

•CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH=CH-CH_2-CH=CH-CH_2-CH=CH-CH_2-CH_2-CH_2-COOH

•ชื่อสามัญ : γ-linolenic acid ชื่อตามระบบ : Octadecatrienoic

•สัญลักษณ์ : 18:3 $\Delta^{6,9,12}$ อยู่ในกลุ่ม : ω6

บุญล้อม (2546)

กรดไขมันที่จำเป็น (Essential fatty acids, EFA)

- **กรดไขมันที่จำเป็น** หมายถึง กรดไขมันที่ร่างกายสัตว์ชั้นสูงสร้างไม่ได้ หรือสร้างได้ไม่เพียงพอกับความต้องการ จำเป็นต้องได้รับจากอาหาร ได้แก่
  - Linoleic acid (C18:2)
  - Linolenic acid (C18:3)
  - Arachidonic acid (C20:4) สังเคราะห์ได้จาก Linoleic acid

  * ถ้าขาด Linoleic acid จะทำให้ขาด Arachidonic acid ไปด้วย

บุญล้อม (2546)

การขาดกรดไขมันที่จำเป็น

- **การขาด**
  - ผิวหนังแห้ง ตกสะเก็ด ผม/ขนร่วง ความจำเสื่อม การเจริญเติบโตช้ากว่าปกติ การมองเห็นเสื่อมสภาพ มีการสะสมของลิปิดที่ผนังหลอดเลือด ทำให้ผนังเส้นเลือดแข็ง ไม่ยืดหยุ่นและแตกง่าย

- **ถ้าได้รับมากเกินไป**
  - ในน้ำมันพืชมักจะมี Linoleic acid อยู่สูง สุกรถ้าได้รับมากเกินไปจะทำให้ไขมันสันหลังเหลว ขาดไวตามินอี ทำให้เกิดโรคกล้ามเนื้อฝ่อลีบ (Muscular dystrophy)

บุญล้อม (2546)

องค์ประกอบของไขมัน

- ไขมันจากแหล่งต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติต่างกันทั้งทางกายภาพและทางเคมี เนื่องจากองค์ประกอบของกรดไขมัน
- การวัดไขมันโดยวัดองค์ประกอบทางอ้อม ได้แก่
  - Iodine number จะบอกว่ามีพันธะคู่มากน้อยเพียงใด
  - Saponification number จะบอกปริมาณกรดไขมันสายสั้น (ค่าสูง = มีมาก)
  - Reichert-Meissl number จะบอกปริมาณกรดไขมันที่ระเหยได้ (ค่าสูง = มีมาก)

บุญล้อม (2546)

- Iodine number
  - จำนวนกรัมของ Iodine ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับไขมัน 100 กรัม ค่านี้บอกให้ทราบถึงจำนวนพันธะคู่ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในไขมันนั้น ๆ
  - ถ้าค่าสูงแสดงว่ามีพันธะคู่มาก

บุญล้อม (2546)

- Saponification number
  - จำนวนมิลลิกรัมของ KOH (ด่างทับทิม) ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับไขมัน 1 กรัม
  - ค่านี้บอกให้ทราบว่า มีปริมาณกรดไขมันสายสั้นมากน้อยเพียงใด ถ้ามีมาก ค่านี้จะสูง

บุญล้อม (2546)

- Reichert-Meissl Number
  - จำนวนมิลลิลิตรของ 0.1N KOH (ด่างทับทิม) ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับไขมัน 5 กรัม
  - ค่านี้จะบอกให้ทราบถึงปริมาณของกรดไขมันระเหยได้
  - ถ้ามีมากค่านี้จะสูง

บุญล้อม (2546)

ปฏิกิริยาทางเคมีของไขมัน

1. **ไฮโดรไลซีส** (Hydrolysis)
   - การย่อยไขมันโดยอาศัยเอนไซม์ไลเปส (Lipase) ที่ผลิตจากตับอ่อนและลำไส้เล็ก ได้เป็น โมโน- และไดเอซิลกลีเซอรอล (Mono-, diacylglycerol) และกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) อยู่รวมกัน
   - การย่อยและการดูดซึมจะเกิดขึ้นที่ลำไส้เล็กส่วนต้น (Duodenum)

บุญล้อม (2546)

2. ซาโปนิฟิเคชั่น (Saponification)

- เป็นการไฮโดรไลซ์ไขมันด้วยด่าง โดยนำไขมันไปต้มกับด่าง จะได้ผลผลิตเป็น กลีเซอรอล (Glycerol) และสบู่ (Soap)
- สบู่สามารถล้างคราบสกปรกและคราบไขมันได้ เพราะในโมเลกุลมีทั้งส่วนที่ชอบไขมัน (Lipophilic) คือ สายโซ่คาร์บอน และ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) คือ โซเดียม หรือ โปแทสเซียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิล
- สบู่ที่เป็นเกลือของแคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg) หรือกรดไขมันที่มี C มากกว่า 22 อะตอม จะไม่ละลายน้ำและไม่มีประโยชน์ในการซักฟอก

บุญล้อม (2546)

- ในทางอาหารสัตว์ นำปฏิกิริยานี้มาช่วยในการผลิต “ไขมันไหลผ่าน” โดยทำให้เกิดสบู่แคลเซียมของไขมันสายยาว ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดปาล์มิติกและเสตียริก (Palmitic acid and Stearic acid) จะถูกย่อยได้น้อยใน pH ของรูเมน
- แต่....เมื่อถึงกระเพาะแท้ ค่า pH จะลดต่ำลง สบู่นี้จะแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งจะถูกย่อยและดูดซึมที่ลำไส้เล็ก

บุญล้อม (2546)

3. การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation)

- เป็นการเติม H^+ เข้าไปในพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว ทำให้กลายเป็นกรดไขมันอิ่มตัว เช่น จากกรดปาล์มิโตเลอิก (Palmitoleic acid) ไปเป็นปาล์มิติก (Palmitic acid)
- ผลที่ได้.... ไขมันแข็งขึ้น มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น
- ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การผลิตเนยเทียม และเนยขาว
- เป็นผลเสียต่อสุขภาพผู้บริโภค เนื่องจากมีไขมันอิ่มตัวสูงขึ้น ทำให้เกิดปัญหาหลอดเลือดอุดตัน

บุญล้อม (2546)

4. **การถูกออกซิไดซ์และการหืน** (Oxidation and rancidity)

– กรดไขมันไม่อิ่มตัว สามารถถูกออกซิไดซ์ที่ C ตัวที่ติดกับพันธะคู่ได้ง่ายโดยการเติมออกซิเจน (O_2)

– ปฏิกิริยาเป็นแบบลูกโซ่ มี 4 ขั้นตอน

1. กระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระ
2. เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ
3. อิเล็กตรอนจัดเรียงตัวใหม่
4. อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากันเอง-สงบ

บุญล้อม (2546)

ปฏิกิริยา Oxidation and rancidity

1. **มีการกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระ** (Free radical) ขึ้นโดยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง (PUFA) เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับสารตัวกลางออกซิเจนที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH•)

อนุมูลอิสระที่พบบ่อย ได้แก่

- ซุปเปอร์ออกไซด์ (O_2•)
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2•)
- อนุมูลเปอร์ออกซิล (ROO•)
- อนุมูลไฮดรอกซิล (OH•) และ
- ไฮโดรเจน (H•)

บุญล้อม (2546)

2. **เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ** โดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อนุมูลเปอร์ออกซิล (ROO•) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของกรดไขมันอีก ได้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) ขณะเดียวกัน อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้อีก

บุญล้อม (2546)

3. **อิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ในโครงสร้างของ ROOH เกิดการเรียงตัวใหม่** ทำให้เกิดการแยกสลายของโมเลกุล ได้เป็นสารประกอบแมลอนไดอัลดีไฮด์ (Malondialdehyde) และสารประกอบลิปิดเปอร์ออกไซด์ที่เล็กลง (Degraded lipid peroxide)

บุญล้อม (2546)

4. เมื่อมีอนุมูลอิสระมากจะทำปฏิกิริยากันเอง และสงบลงในที่สุด

บุญล้อม (2546)

- ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกว่า Autoxidation ได้แก่
  - สภาพที่มีความร้อน
  - รังษีอัลตราไวโอเล็ต และ
  - โลหะบางชนิด เช่น ทองแดงและตะกั่ว
- ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิไดซ์ตนเอง
  - เป็นสารไม่คงตัว
  - สามารถสลายตัวเป็นสารอัลดีไฮด์และสารประกอบลิปิดขนาดเล็ก
  - ทั้งสองตัวเป็นสารที่ระเหยง่ายและมี**กลิ่นหืน**

บุญล้อม (2546)

การหืนของไขมัน ยังเกิดได้อีก 2 กรณี ได้แก่...

1. **Hydrolytic rancidity or lipolysis**
    1. เกิดจากไขมันถูกย่อยโดยเอนไซม์ที่มีอยู่ในอาหารตามธรรมชาติและจุลินทรีย์
    2. ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระสูงกว่าปกติ มักเกิดในไขมันนมและน้ำมันมะพร้าว เพราะมีกรดลอริก (Lauric acid) สูง ทำให้เกิดกลิ่นคล้ายสบู่
    3. การป้องกันการหืน ทำได้โดย การทำน้ำมันให้บริสุทธิ์ (Refining) เพื่อทำลายเอนไซด์

บุญล้อม (2546)

2. Ketonic rancidity

1. เกิดจากจุลินทรีย์ทำปฏิกิริยาเบต้าออกซิเดชั่นกับกรดไขมันอิ่มตัว ทำให้เกิดสาร Methyl ketone ที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น เพนตะโนน ซึ่ง**มีกลิ่นและรสเอียน**
2. การทำเนยแข็งให้นุ่ม (Soft cheese) และเนยประเภทบลูชีส (Blue cheese) จะมีการเพาะเชื้อราเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้

บุญล้อม (2546)

สารต้านการออกซิไดซ์และสารกันหืน

- ไขมันในธรรมชาติมีความทนทานต่อการออกซิเดชั่น เนื่องจากมีสารต้านการออกซิไดซ์ในธรรมชาติ เช่น
  - Phenols
  - Quinones
  - Tocopherols หรือ ไวตามิน อี (มักถูกเรียกว่า สารป้องกันการหืนในธรรมชาติ, Natural antioxidant)
  - Gallic acid
  - Gallate

พันทิพา (2543)

สารกันหืนสังเคราะห์ (Antioxidant)

- สารกันหืนสังเคราะห์ที่นิยมใช้ ได้แก่
  - Butylated hydroxy anisole (BHA)
  - Butylated hydroxy toluene (BHT)
  - Propyl gallate (PG)
- สาร Antioxidant ทำหน้าที่เติม H^+ ให้ electron

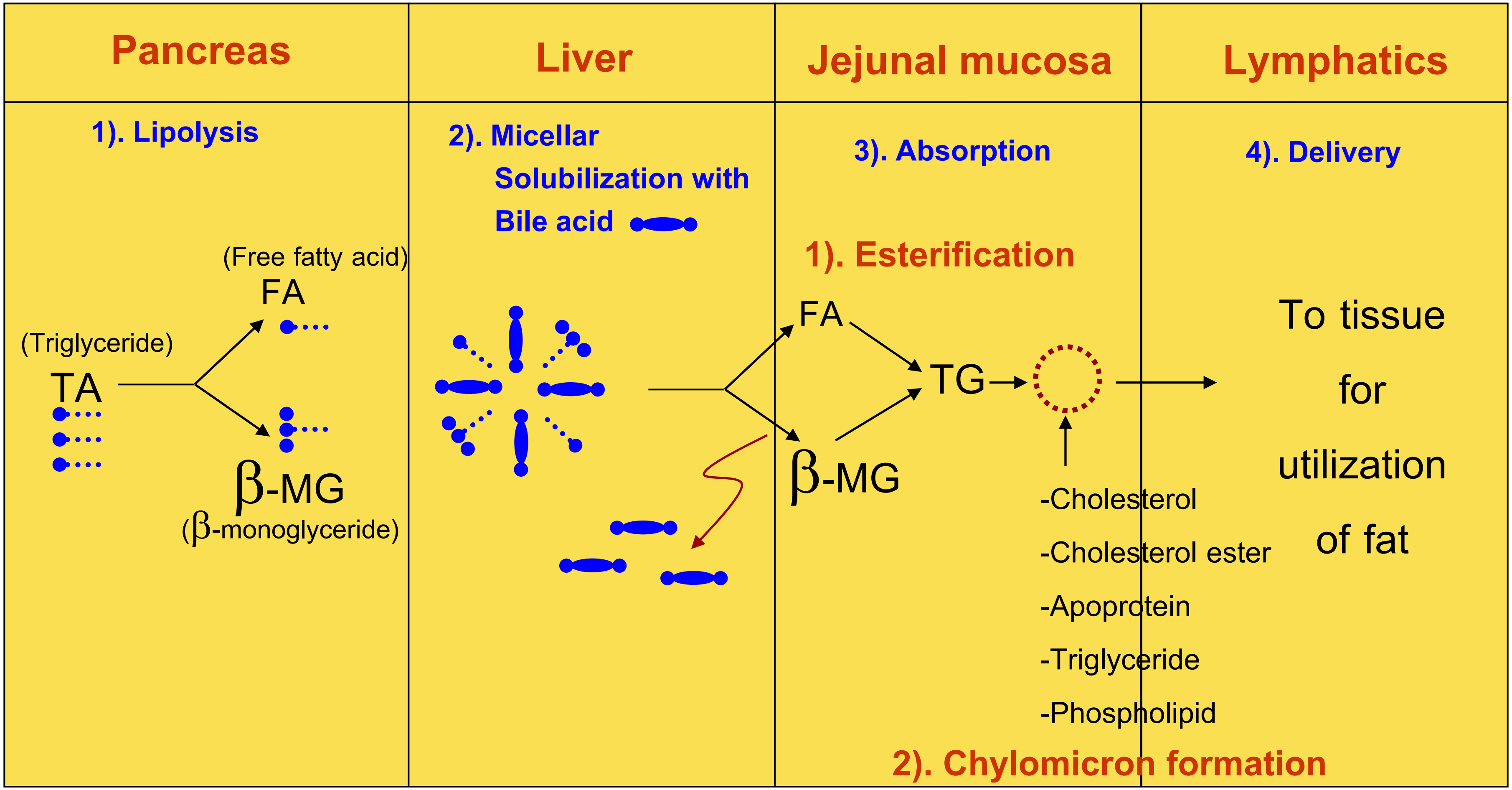
บุญล้อม (2546)

Antiprooxidant

- โลหะหนักบางชนิด เช่น Cu, Fe และ Ni จะเป็นตัวเร่งให้ไขมันถูกออกซิไดซ์เร็วขึ้น เราเรียกกลุ่มโลหะหนักนี้ว่า "**Prooxidant**"
- ดังนั้น เวลาเก็บอาหาร หรือผสมอาหารจะต้องพยายามหลีกเลี่ยง**ไม่ให้ไขมันได้มีโอกาสสัมผัสกับโลหะ**เหล่านี้ แต่**ทำได้ยาก**
- สารยับยั้งการทำงานของ Prooxidant เรียกว่า Antiprooxidant ได้แก่ Phosphoric acid, Citric acid และ ไวตามิน ซี
- การผสมอาหารที่มีไขมันสูงและต้องเก็บไว้นาน จะต้องเติมสาร Antioxidant ควบคู่กับ Antiprooxidant ด้วย
- การใช้ร่วมกัน
  - BHA หรือ BHT ใช้ร่วมกับ Phosphoric acid หรือ Citric acid
  - BHA หรือ BHT ใช้ร่วมกับไวตามิน ซี
  - ไวตามิน อี ใช้ร่วมกับ ไวตามิน ซี

พันทิพา (2543)

การย่อยและการดูดซึมไขมัน



ที่มา: เพทาย (2538)

การสลายไขมัน

- เมื่อร่างกายจำเป็นต้องใช้ไขมันสำรองไปเป็นแหล่งพลังงาน
- ฮอร์โมนกลูคากอน (Glucagon) ในกระแสเลือดจะเพิ่มขึ้น เพื่อกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ไตรกลีเซอไรด์ไลเปส (Triglyceride lipase) ให้สลายไตรเอซิลกลีเซอรอล (Triacylglycerol) เป็นกรดไขมัน
- จากนั้น กรดไขมันจะถูกนำออกจากเนื้อเยื่อไขมันเข้าไปในกระแสเลือดโดยรวมตัวกับอัลบูมิน (Albumin) ส่งไปยังเนื้อเยื่อต่าง ๆ เช่น ตับ หัวใจ ไต กล้ามเนื้อ ปอด อัณฑะ และสมอง เป็นต้น
- เพื่อถูกออกซิไดซ์โดยกระบวนการวิถีเบต้า-ออกซิเดชั่น (β-oxidation pathway)

บุญล้อม (2546)

การใช้กลีเซอรอลเป็นแหล่งพลังงาน

- กลีเซอรอลเปลี่ยนไปเป็นกลูโคสได้ โดยเข้าสู่วิถี ไกลโคไลซีส (Glycolysis pathway)

Glycerol

↓

Dihydroxyacetone Phosphate

↓

Glyceraldehyde – 3 – Phosphate

↓

Pyruvate

↓

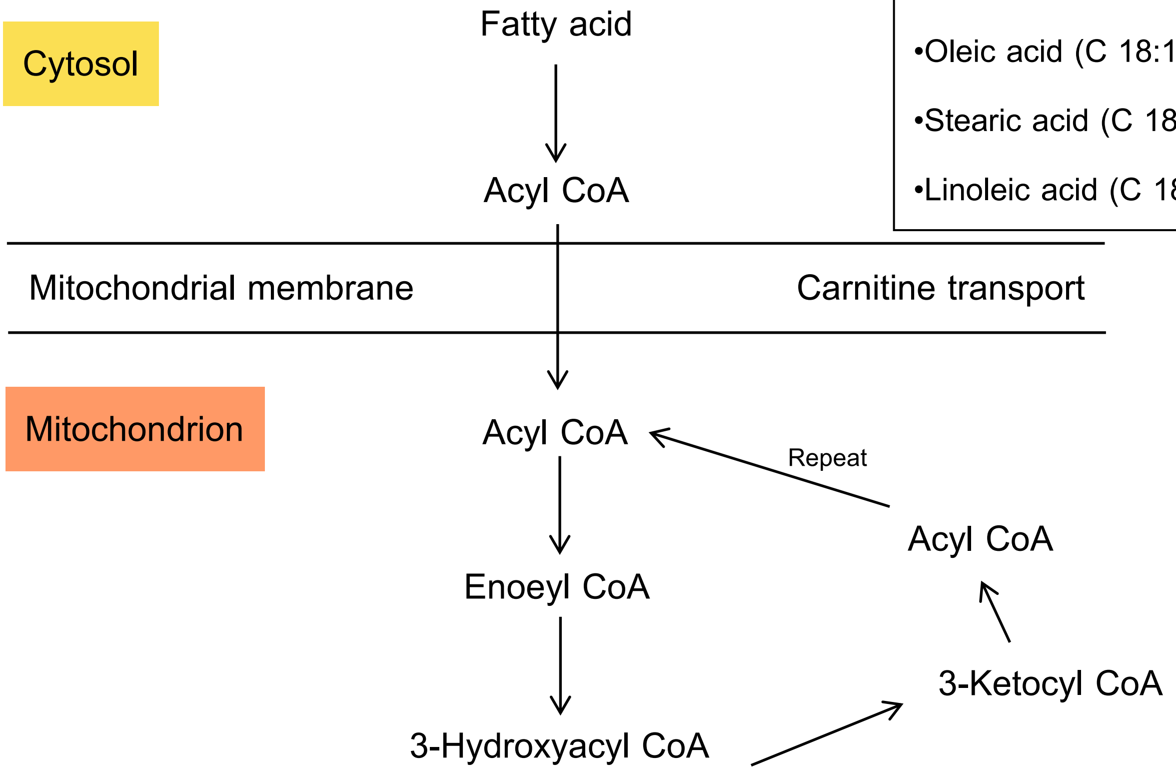
TCA Cycle

พลังงาน 22 ATP ต่อกลีเซอรอล 1 โมล

บุญล้อม (2546)

การใช้กรดไขมันเป็นแหล่งพลังงาน

- การใช้กรดไขมันส่วนใหญ่จะเข้าสู่วิถีเบต้าออกซิเดชั่น (β-oxidation) ซึ่งเป็นกระบวนการใช้ออกซิเจนและเกิดขึ้นในไมโตคอนเดรีย



- Stearic acid (C 18:0) ผ่านเบต้าออกซิเดชั่น 8 รอบ = 146 ATP
- Oleic acid (C 18:1) ผ่านเบต้าออกซิเดชั่น 8 รอบ = 144 ATP
- Stearic acid (C 18:0) ผ่านเบต้าออกซิเดชั่น 8 รอบ = 146 ATP
- Linoleic acid (C 18:2) ผ่านเบต้าออกซิเดชั่น 8 รอบ = 142 ATP

กรดไขมันพันธะคู่จะให้พลังงานลดลง
2 ATP ต่อ 1 พันธะคู่

บุญล้อม (2546)

การสังเคราะห์ไขมัน

- ไขมันที่สะสม อาจมาจาก ไขมันที่กินเข้าไป หรือ สังเคราะห์จากโภชนะอื่น เช่น โปรตีนหรือคาร์โบไฮเดรต

แร่ธาตุ (Minerals)

- **แร่ธาตุ (Minerals)** หมายถึง... สารอนินทรีย์ซึ่งไม่สามารถทำให้สลายหรือสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่โดยปฏิกิริยาทางเคมีธรรมดา และอาจพบได้ในสิ่งมีชีวิตในรูปเกลืออนินทรีย์ หรือสารประกอบอนินทรีย์ก็ได้
- **ในทางโภชนศาสตร์** แร่ธาตุคือส่วนประกอบที่อยู่ในเถ้า (Ash) ภายหลังจากการเผาอาหารนั้นสมบูรณ์แล้ว
- แร่ธาตุที่สัตว์ต้องการในอาหารในปริมาณที่สูง (เกินกว่า 100 ppm ของอาหาร) เรียกว่า "**แร่ธาตุหลัก**" (Major- หรือ Macrominerals)
- แร่ธาตุที่สัตว์ต้องการในอาหารน้อย (น้อยกว่า 100 ppm ของอาหาร) เรียกว่า "**แร่ธาตุรอง**" (Trace- หรือ Microminerals)

สาโรช (2547)

ชื่อและสัญลักษณ์ของแร่ธาตุ

ไทย	อังกฤษ	สัญลักษณ์
แคลเซียม	Calcium	Ca
ฟอสฟอรัส	Phosphorus	P
โพแทสเซียม	Potassium	K
โซเดียม	Sodium	Na
คลอรีน	Chlorine	Cl
กำมะถัน หรือ ซัลเฟอร์	Sulphur	S
แมกนีเซียม	Magnesium	Mg
เหล็ก หรือ ไอออน	Iron	Fe
สังกะสี หรือ ซิงค์	Zinc	Zn
ทองแดง หรือ คอปเปอร์	Copper	Cu

พันทิพา (2543)

ไทย	อังกฤษ	สัญลักษณ์
แมงกานีส	Manganese	Mn
ไอโอดีน	Iodine	I
โคบอลต์	Cobalt	Co
โมลิบดินัม	Molybdenum	Mo
ซีลีเนียม	Selenium	Se
ฟลูออรีน	Fluorine	F
โบรมีน	Bromine	Br
แบเรียม	Barium	Ba
สตรอนเชียม	Strontium	Sr
อะลูมิเนียม	Aluminium	Al

พันทิพา (2543)

ไทย	อังกฤษ	สัญลักษณ์
อาร์เซนิก	Arsenic	As
โบรอน	Boron	Bo
ตะกั่ว หรือ เลด	Lead	Pb
นิกเกิล	Nikle	Ni
รูทิเนียม	Ruthenium	Ru
ซิลิคอน	Silicon	Si
โครเมียม	Chromium	Cr

พันทิพา (2543)

ประเภทของแร่ธาตุในอาหารสัตว์

แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ...

1) **แร่ธาตุที่จำเป็นต้องมีในอาหาร** (Indispensable หรือ essential minerals) เป็นแร่ธาตุที่มีบทบาทหน้าที่ต่อสรีระในร่างกาย จะขาดไปจากอาหารไม่ได้ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ...

   1) **แร่ธาตุหลัก...** มี 7 ธาตุ คือ แคลเซียม (Ca), คลอรีน (Cl), โปแตสเซียม (K), แมกนีเซียม (Mg), โซเดียม (Na), ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S)

   2) **แร่ธาตุรอง...** มี 14 ธาตุ คือ โคบอลท์ (Co), โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), ฟลูออรีน (F), เหล็ก (Fe), ไอโอดีน (I), แมงกานีส (Mn), โมลิบดีนัม (Mo), นิคเกิล (Ni), ซีลีเนียม (Se), ซิลิคอน (Si), ดีบุก (An), เวเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn)

สาโรช (2547)

2) **แร่ธาตุที่ไม่จำเป็นต้องมีในอาหาร** (Dispensable หรือ nonessential minerals) เป็นแร่ธาตุที่พบในอาหาร และ/หรือใน ร่างกายสัตว์ แต่ยังไม่ทราบบทบาทและหน้าที่ในร่างกาย...

สาโรช (2547)

บทบาทและหน้าที่ของแร่ธาตุในร่างกาย (สรุป)

1. เป็นส่วนประกอบและเสริมสร้างความแข็งแรงของกระดูกและโครงร่าง
2. เป็นส่วนประกอบของสารประกอบอินทรีย์ เช่น โปรตีน, ไขมัน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของกล้ามเนื้อ เม็ดเลือด และอวัยวะต่าง ๆ
3. เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์
4. ช่วยควบคุมสมดุลของของเหลวในเซลล์ โดยควบคุมสมดุลของแรงดันออสโมซีสของเซลล์
5. ควบคุมสมดุลกรด-เบสของร่างกาย
6. ช่วยในการทำงานของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ
7. มีส่วนเกี่ยวข้องในขบวนการเมตาบอลิซึมของร่างกาย

สาโรช (2547)

แคลเซียม (Calcium; Ca)

- **บทบาทหรือหน้าที่หลัก**
  - เป็นส่วนประกอบของกระดูกและฟัน ≅99% ของ Ca ทั้งหมดในร่างกาย
  - สร้างกระดูก, การแข็งตัวของเลือด (Ca อยู่ในพลาสมา), การทำงานของกล้ามเนื้อ, การทำงานของระบบประสาท, การซึมผ่านผนังเซลล์ของสารต่าง ๆ
  - ในเถ้ากระดูกมี ≅Ca 36%, ≅P 17% แต่จะไม่คงที่ เนื่องจากมีการสะสมและย้ายออกตลอดเวลาเพื่อสร้างผลผลิต เช่น ไข่ นม ฯลฯ

สาโรช (2547)

- **อาการขาด**
  - สัตว์กำลังเจริญเติบโต จะเกิดโรคกระดูกอ่อน (Ricket) กระดูกมีรูปร่างผิดปกติ ข้อต่อจะขยายยาว เดินกระแผลก ข้อกระดูกเหยียดตรงงอไม่ได้
  - สัตว์ที่โตแล้วจะเกิดโรคกระดูกผุ (Osteomalacia) เนื่องจาก Ca จะถูกดึงไปใช้โดยไม่มีการทดแทน ทำให้กระดูกไม่แข็งแรง หักง่าย
  - ไก่ไข่ จะงอยปากอ่อน การเจริญโตโตหยุดชะงัก ขาโก่ง ไข่เปลือกบาง ไข่ลดลง

- สัดส่วน Ca และ P (Ca-P ratio)
  - ในสัตว์ทั่วไป Ca : P = 1 : 1 - 2 : 1
  - ไก่กำลังให้ไข่ สัดส่วน Ca มากกว่านี้
  - ในไก่ไข่ กระเพาะพักและกระเพาะบด จะเป็นแหล่งเก็บ Ca แล้วจะค่อยส่ง Ca เข้าสู่ระบบย่อยอาหาร พบว่า Ca เลือดจะสูงสุดในช่วงเที่ยงวันและเที่ยงคืน และจะลดลงต่ำสุดในเวลา 6 โมงเช้าและ 6 โมงเย็น

- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับธาตุอื่น**
  - วิตามิน D ช่วยในการดูดซึม, ถ้ามีฟอสเฟตหรือแมกนีเซียมสูงเกินไปการดูดซึมจะลดลง โดยแมกนีเซียมจะเข้าไปแทนที่แคลเซียมในกระดูกและเพิ่มการขับถ่ายแคลเซียม
- **แหล่ง Ca**
  - ปลาป่น กระดูกป่น เนื้อและกระดูกป่น หินฝุ่น ไดแคลเซียมฟอสเฟต (Dicalcium phosphate)
  - Ca จากพืชมักใช้ประโยชน์ได้น้อย เพราะมักอยู่ในรูปแคลเซียมออกซาเลต

ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P)

- บทบาทหรือหน้าที่
  - P และ Ca มีความสัมพันธ์กัน
  - เป็นสารประกอบของกระดูก Phosphoprotein, Nucleic acid, Phospholipids
  - มีบทบาทในการเมตาบอลิซึมคาร์โบไฮเดรต เช่น Glucose-6-phosphate, Adenosine di หรือ tri-phosphate
  - ช่วยในการควบคุมสมดุลกรด-เบสภายในและภายนอกเซลล์

- **อาการขาด**
  - กระดูกอ่อน, กระดูกผุ
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - วิตามิน D ช่วยในการสร้างกระดูกและดูดซึมฟอสฟอรัสกลับในไต, ถ้ามีแคลเซียมและแมกนีเซียมสูงเกินไปจะทำให้การดูดซึมฟอสฟอรัสลดลง
- **แหล่งของ P**
  - เมล็ดธัญพืช ปลาป่น เนื้อและกระดูกป่น
  - เมล็ดธัญพืชการใช้ประโยชน์ P ได้น้อย เนื่องจากมักจะอยู่ในรูปของ Phytates ซึ่งเป็นเกลือของ Phytic acid และ Phosphoric acid ทำให้สัตว์ใช้ประโยชน์ได้น้อยลง

โปแตสเซียม (Potassium; K)

- **บทบาทหรือหน้าที่**
  - ทำหน้าที่ร่วมกับ Na, Cl และ Bicarbonate ion
  - เป็นอิออนบวกภายในเซลล์ที่ทำให้เกิดแรงดันออสโมซีส และรักษาสมดุลกรด-เบส
- **อาการขาด**
  - เกิด Hypokalemia (K ในเลือดต่ำกว่าปกติ), การเจริญเติบโตชะงัก, ชักกระตุก, ท้องร่วง, ท้องอยู่ผิดตำแหน่ง, หมดสติ และตาย
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**

สาโรช (2547)

โซเดียม (Sodium; Na)

- **บทบาทหรือหน้าที่**
  - เป็น Ion^{+} ที่เป็นหลักภายนอกเซลล์ที่ช่วยให้เกิดแรงดันออสโมซีส และสมดุลกรด-เบส, ช่วยในการซึมผ่านผนังเซลล์ของสารอาหาร และช่วยในการทำงานของกล้ามเนื้อ
- **อาการขาด**
  - การเจริญเติบโตลดลง, ตาอักเสบ (Corneal lesion), ระบบสืบพันธุ์ผิดปกติ (เป็นหมันและเป็นหนุ่มเป็นสาวช้ากว่ากำหนด)
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - ถ้าหากมีเกลือในอาหารเกิน 8% จะทำให้เป็นพิษ, ตาบอด ประสาททำงานผิดปกติและชักกระตุก

สาโรช (2547)

คลอรีน (Chlorine; Cl)

- **บทบาทหรือหน้าที่**
  - ทำหน้าที่ร่วมกับ Na และ Kเพื่อรักษาสมดุลกรด-ด่าง (Acid-base balance)
  - เป็นอิออนลบที่เป็นหลักในระบบออสโมซีสของกรดเกลือในน้ำย่อย

- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - ได้รับมากเกินไป ทำให้กระหายน้ำมาก กล้ามเนื้อเปลี้ยและเกิดการบวมน้ำ (Edema)
  - ในอาหารไม่ควรเติมเกลือเกิน 1%

กำมะถัน หรือ ซัลเฟอร์ (Sulfur; S)

- **บทบาทหรือหน้าที่**
  - เป็นส่วนประกอบของกลุ่มซัลไฟดริล (SH) ของกรดอะมิโนบางตัว (ซีสทีน, ซีสเตอิน และเมทไธโอนีน), กลุ่มซัลไฟดริลมีหน้าที่ในการหายใจของเนื้อเยื่อต่าง ๆ
- **อาการขาด**
  - การเจริญเติบโตชะงักเนื่องจากขาดกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ
  - ปกติมักจะไม่ขาด ถ้าขาดแสดงว่า สัตว์ขาดโปรตีนด้วย
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**

สาโรช (2547)

แมกนีเซียม (Magnesium; Mg)

- **บทบาทหรือหน้าที่**
  - เป็นตัวกระตุ้นเอนไซม์ในระบบ Glycolysis, ช่วยในการสร้างกระดูก
- **อาการขาด**
  - เส้นเลือดขยายตัว, ตื่นเต้นง่ายและชักกระตุก, ขาดสมดุลในการทรงตัวและสั่น
- **อาการเป็นพิษและความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - ถ้าหากมีสูงเกินไปจะขัดขวางการใช้ประโยชน์ของแคลเซียมและฟอสฟอรัส

สาโรช (2547)

เหล็ก (Ferrous, Iron; Fe)

- **บทบาทและหน้าที่**
  - เกี่ยวข้องกับการหายใจและการแลกเปลี่ยนออกซิเจน
- **อาการขาด**
  - โลหิตจาง (Hypochromic microcytic)
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - สัดส่วนระหว่าง Ca และ P มีผลต่อการดูดซึมเหล็กและทองแดง, มีผลต่อการใช้ประโยชน์ของเหล็ก, หากขาดวิตามิน B_6 จะลดการดูดซึมเหล็ก

สาโรช (2547)

ทองแดง (Copper; Cu)

- **บทบาทและหน้าที่**
  - เป็นปัจจัยร่วม (Co-factor) ของเอนไซม์หลายชนิด, มีบทบาทในการสังเคราะห์ฮีโมโกลบิน, สร้างกระดูก และ Myelin ของประสาท
- **อาการขาด**
  - สีขนจางหรือขนไม่ขึ้น, โลหิตจาง, กระดูกเปราะ, ข้อต่อของกระดูกบวม และมีอาการทางประสาท
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - หากมีโมลิบดินัมและสังกะสีมากเกินไป จะไปยับยั้งการใช้ประโยชน์ทองแดง , หากทองแดงในอาหารเกิน 250 ppm จะเป็นพิษ โดยสัตว์จะมีอาการคล้ายกับขาดทองแดง

สาโรช (2547)

สังกะสี (Zinc; Zn)

- **บทบาทหรือหน้าที่**
  - เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์หลายชนิด เช่น Peptidase, Carbonic anhydrase ฯลฯ.
- **อาการขาด**
  - การเจริญของขนผิดปกติ, ขนร่วง, หนังหนา, หยาบและตกสะเก็ด (Parakertosis ในสุกร)
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - ถ้าหากมี Ca และ P สูงเกินไป จะไปขัดขวางการใช้ประโยชน์ของสังกะสี, ถ้าหากสังกะสีมีมากเกินไปก็จะไปขัดขวางการใช้ประโยชน์ของทองแดงทำให้เกิดโรคโลหิตจาง

สาโรช (2547)

แมงกานีส (Manganese; Mn)

- **บทบาทและหน้าที่**
  - มีบทบาทในการสร้างกระดูก, การเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์, กระตุ้นระบบเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับ Oxidative phosphorylation, การใช้กระอะมิโน , กรดไขมัน และคอเลสเตอรอล
- **อาการขาด**
  - การเจริญเติบโตชะงัก, กระดูกสั้นผิดปกติ, อัณฑะฝ่อ, การตกไข่ผิดปกติ, ขาพิการ (Perosis) โดยเกิดจากเส้นเอ็นเคลื่อน (Slipped tendon) ในสัตว์ปีก)
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - ถ้าหากมี Ca และ P สูงเกินไปจะลดการดูดซึมแมงกานีส

สาโรช (2547)

โคบอลท์ (Cobalt; Co)

- **บทบาทและหน้าที่**
  - เป็นส่วนประกอบของวิตามิน B_{12}
- **อาการขาด**
  - โรคโลหิตจาง (Normocytic, normochromic ถึง megaloblastic หรือ macrocytic)
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**

สาโรช (2547)

ไอโอดีน (Iodine; I)

- **บทบาทหรือหน้าที่**
  - เป็นส่วนประกอบของฮอร์โมน Thyroxine
- **อาการขาด**
  - ลูกสัตว์ตายเมื่อคลอด ลูกสัตว์คลอดออกมาไม่มีขน คอหอยพอก
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**

สาโรช (2547)

ซีลีเนียม (Selenium; Se)

- **บทบาทหรือหน้าที่**
  - เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ Glutathione peroxidase ซึ่งทำหน้าที่ในการ Antioxidation ร่วมกับวิตามิน E
- **อาการขาด**
  - ถ้าขาดพร้อมกับวิตามิน E ทำให้สัตว์ปีกตาย, กล้ามเนื้อสลาย, ตับมีแผล, เนื้อตาย และบวม (Exudative diathesis)
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - การเป็นพิษเรื้อรัง; อาการทางประสาท (Blind disease) และสมดุลกรด-เสียไป (Alkali disease)
  - การเป็นพิษเฉียบพลัน; ตาย, อนุมูลของซัลเฟตจะช่วยป้องกันการเป็นพิษของ Se ได้ดี

สาโรช (2547)

โมลิบดินัม (Molybdenum; Mo)

- บทบาทและหน้าที่
  - เกี่ยวข้องกับเมตาบอลิซึมของเพียวรีน (Purine metabolism)
- อาการขาด
  - ไม่ค่อยขาด, หากขาดจะทำให้สัตว์เปลี่ยน Xanthine เป็นกรดยูริกไม่ได้
- อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น
  - ถ้าหากมีมากเกินไปจะขัดขวางระบบเอนไซม์ที่มีทองแดงเป็นตัวกระตุ้น, ท้องร่วง และโลหิตจาง, อนุมูลซัลเฟตจะช่วยป้องกันพิษของโมลิบดีนัมได้ดี

สาโรช (2547)

ฟลูออรีน (Fluorine; F)

- **บทบาทและหน้าที่**
  - ป้องกันฟันผุ
- **อาการขาด**
  - ไม่ค่อยขาด, หากขาดจะเกิดโรคฟันผุ
- **อาการเป็นพิษหรือความสัมพันธ์กับแร่ธาตุอื่น**
  - ถ้าหากมีเกิน 10 ppm จะขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับแมงกานีส และการสร้างกระดูก, อะลูมินั่มจะช่วยป้องกันพิษของฟลูออรีนได้

สาโรช (2547)

วิตามิน (Vitamins)

- วิตามิน เป็นโภชนะที่มีองค์ประกอบซับซ้อน และมีความจำเป็นต่อปฏิกิริยาทางเคมีในร่างกาย
- วิตามิน ที่ยอมรับกันว่า มีความสำคัญในทางโภชนศาสตร์ มี 18 ตัว
- การตั้งชื่อวิตามินสมัยก่อน ตั้งชื่อเป็นตัวอักษรขึ้นอยู่กับเวลาที่ค้นพบ แต่ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะใช้ชื่อตามคุณสมบัติทางเคมี (Chemical nature) มากกว่า...

พันทิพา (2543)

การจำแนกกลุ่มวิตามิน... ตามคุณสมบัติการละลาย

- **วิตามินที่ละลายได้ในไขมัน (Fat soluble vitamin)...** จะพบรวมอยู่กับไขมันที่สกัดออกจากอาหาร

ชื่อวิตามิน	ชื่อทางเคมี (Chemical name)
A	Retinol
D_2	Ergocalciferol
D_3	Chlorecalciferol
E	α-tocopherol
K	Phylloquinone

พันทิพา (2543)

- **วิตามินที่ละลายได้ในน้ำ (Water soluble vitamin)...** จะพบได้จากน้ำที่สกัดออกมาจากอาหาร

พันทิพา (2543)

ชื่อวิตามิน	ชื่อทางเคมี (Chemical name)
B1	Thiamine
B2	Riboflavine
-	Nicotinamide
B6	Pyridoxine
-	Pantothenic acid
-	Biotin
-	Folic acid
-	Choline
B12	Cyanocobalamine
C	Ascorbic acid

หน่วยของวิตามิน

- **วิตามิน A**
  - คิดเป็นหน่วยสากล (International Unit; I.U.)

1 I.U. = 0.3 μg. Vitamin A alcohol

= 0.344 μg. Vitamin A acetate

= 0.55 μg. Vitamin A palmitate

= 0.358 μg. Vitamin A propionate

= 0.6 μg. β-carotene

= 1 Usp

β–carotene 0.6 μg. จะทำงานได้ (Activity) เท่ากับ วิตามิน A 0.3 μg.

ส่วนมาก carotene ในอาหารมักมีหน่วยเป็น มก./กก. หรือ ppm.

พันทิพา (2543)

- **วิตามิน D**
  - คิดเป็นหน่วยสากล (International Unit; I.U.)

    1 I.U. = 0.025 μg. Vitamin D_3 crystalline

  ในไก่ใช้ I.C.U. (International Chick Unit) ซึ่งหมายถึง เฉพาะ D_3

  เนื่องจาก ไก่สามารถใช้ D_3 มากกว่า D_2
- **วิตามิน E**
  - คิดเป็นหน่วยสากล (International Unit; I.U.)

    1 I.U. = 1 mg. α-tocopherol acetate

วิตามิน E สังเคราะห์ที่ขายอยู่ในรูป α-tocopherol acetate

พันทิพา (2543)

วิตามิน A

- **หน้าที่**
  - สร้างกระดูก, การทำงานของสายตา (Rhodopsin), สุขภาพของเยื่อชุ่ม, สังเคราะห์กลูโคส (Adrenocorticoid hormone) และการเจริญเติบโต
- **อาการขาด**
  - ตาบอดกลางคืน (Night blindness), ผิวหนังตกสะเก็ด, การเจริญเติบโตชะงัก, การสืบพันธุ์ล้มเหลว
- **การเป็นพิษ**
  - อาการเป็นพิษคล้ายกับอาการขาด, กระดูกเจริญผิดปกติ, ผิวหนังตกสะเก็ด

สาโรช (2547)

วิตามิน D

- **หน้าที่**
  - สร้างกระดูก (การดูดซึม Ca และ P และการพอกพูน Ca ในกระดูก), การใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรต (Phosphorylation) และการเจริญเติบโต
- **อาการขาด**
  - โรคกระดูกอ่อน, กระดูกผุ, เปลือกไข่นิ่ม
- **การเป็นพิษ**
  - เคลื่อนย้าย Ca จากกระดูกไปสู่เนื้อเยื่ออื่น ๆ

สาโรช (2547)

วิตามิน K

- **หน้าที่**
  - สร้างโปรทรอมบิน (Prothrombin) ซึ่งช่วยให้เลือดแข็งตัว
- **อาการขาด**
  - เลือดไหลไม่หยุดและแข็งตัวช้า
- **การเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)

วิตามิน E

- **หน้าที่**
  - ป้องการการออกซิไดซ์ไขมัน, ป้องกันการสลายตัวของกล้ามเนื้อ, ช่วยให้ระบบสืบพันธุ์เป็นปกติ โดยเฉพาะ Seminiferous epithelium
- **อาการขาด**
  - กล้ามเนื้อสลายตัว, บวมน้ำ, การสืบพันธุ์ล้มเหลว
- **อาการเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)

Thiamin

- **หน้าที่**
  - เป็น Co-enzyme ในรูป Thiamine pyrophosphate ซึ่งมีบทบาทในปฏิกิริยา Decarboxylation และ Transketolation
- **อาการขาด**
  - โรคเหน็บชา, ในไก่จะมีอาการชักกระตุกโดยแหงนหน้าไปข้างหลัง, และมีปัญหาเกี่ยวกับระบบเส้นเลือดในหัวใจ
- **การเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)

Riboflavin

- **หน้าที่**
  - เป็น Co-enzyme (FMN และ FAD) สำคัญในการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนในระบบการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน (Dehydrogenation)
- **อาการขาด**
  - ผิวหนังหนาตกสะเก็ด, ขนร่วง, ทำให้เกิดขาพิการในสัตว์ปีก (Curled toe paralysis)
- **การเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)

Pantothenic acid

- **หน้าที่**
  - เป็นส่วนสำคัญของโคเอนไซม์เอ (Co-A)
- **อาการขาด**
  - ผิวหนังตกสะเก็ด, ขนร่วงและสีซีดจาง, อาการผิดปกติทางประสาท ในสุกรจะเดินยกขาหลังสูงผิดปกติ, เป็นอัมพาต, การเจริญเติบโตชะงัก และการสืบพันธุ์ล้มเหลว
- **การเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)

Niacin

- **หน้าที่**
  - เป็น Co-enzyme (NAD และ NADP) ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน
- **อาการขาด**
  - ผิวหนังหยาบและตกสะเก็ด, ท้องร่วง, เป็นแผลแตกเลือดไหลที่มุมปาก,
- **การเป็นพิษ**
  - เส้นเลือดขยายตัวเป็นผื่นคันแดงและไหม้ตามผิวหนัง, มีไขมันแทรกในเนื้อตับ

สาโรช (2547)

Pyridoxine

- **หน้าที่**
  - เป็น Co-enzyme (Pyridoxal phosphate) ที่ตัดกลุ่มคาร์บอกซิล (-COOH) กลุ่มอะมิโน (NH_2) และกลุ่มซัลไฟดริล (SH) ของกรดอะมิโน
- **อาการขาด**
  - มีอาการทางประสาท, ชักและตื่นเต้นง่าย, โลหิตจาง, ขับถ่ายกรด Xanthurenic มากผิดปกติ
- **การเป็นพิษ**
  - ชักตาย

สาโรช (2547)

Biotin

- **หน้าที่**
  - เป็น Co-enzyme (Biocytin) ในระบบการเคลื่อนย้ายคาร์บอนไดออกไซด์ให้แก่สารเมตตาบอไลท์ต่าง ๆ
- **อาการขาด**
  - ผิวหนังหยาบตกสะเก็ด, ขนร่วง, ตาเป็นฝ้าขาว
- **การเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)

Folic acid

- **หน้าที่**
  - เป็นพาหะในการเคลื่อนย้ายคาร์บอน
- **อาการขาด**
  - โลหิตจาง และอัมพาต
- **การเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)

Choline

- **หน้าที่**
  - เป็นส่วนประกอบของ Acetylcholine และ Phospholipid, เป็นแหล่งให้กลุ่มเมทิล (CH_3) ในปฏิกิริยาของร่างกาย
- **อาการขาด**
  - ไตพิการและสลายตัว, มีไขมันแทรกในเนื้อตับ, การสืบพันธุ์และการให้นมเสื่อมลง
- **การเป็นพิษ**
  - ท้องร่วงเรื้อรัง

สาโรช (2547)

วิตามิน B_{12}

- **หน้าที่**
  - มีบทบาทให้การเคลื่อนย้ายกลุ่มเมทิล (CH_3)
- **อาการขาด**
  - โลหิตจางพร้อมกับเซลล์สร้างเม็ดเลือดในโพรงกระดูกขยายตัว, มีอาการทางประสาท, ไข่ฟักไม่ออก, การเจริญเติบโตชะงัก
- **การเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)

วิตามิน C

- **หน้าที่**
  - การสังเคราะห์คอลลาเจน (Collagen) และช่วยในการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน
- **อาการขาด**
  - เลือดออกตามไรฟัน, แผลหายยาก, เหงือกอักเสบ, ข้อต่อบวม, โลหิตจาง
- **การเป็นพิษ**
  - ไม่เป็นพิษ

สาโรช (2547)